



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM141585**

**PERANCANGAN *MODULAR CONTROLLER 3  
PHASE BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)  
MOTOR MENGGUNAKAN ARM 32-BIT CORTEX  
M-4 MCU**

**AGUS MUKHLISIN  
NRP 2109 100 016**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Muhammad Nur Yuniarto**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TM141585**

# **DESIGN OF MODULAR CONTROLLER 3 PHASE BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR USING ARM 32-BIT CORTEX M-4 MCU**

**AGUS MUKHLISIN**  
**NRP 2109 100 016**

**Student Advisor**  
**Dr. Muhammad Nur Yuniarto**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2015**

**HALAMAN PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR (TM141585)**

**PERANCANGAN MODULAR CONTROLLER 3 PHASE  
BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR  
MENGUNAKAN ARM 32-BIT CORTEX M-4 MCU**

Ditujukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada : Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Disusun Oleh :  
**AGUS MUKHLISIN**  
**NRP. 2109100016**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Muhammad Nur Yudianto ..... (Pembimbing)  
NIP. 197506301998021004
2. Dr. Eng Sutikno, ST, MT ..... (Penguji I)  
NIP. 197407032000031001
3. Indra Sidharta, ST, MSc ..... (Penguji II)  
NIP. 198006192006041004
4. Wahyu Wijanarko, ST, MSc ..... (Penguji III)  
NIP. 198202092012121001

**SURABAYA**  
**Januari 2015**

**Perancangan *Modular Controller 3 Phase Brushless Direct Current (BLDC) Motor* Menggunakan ARM 32-Bit Cortex M-4 MCU**

Nama Mahasiswa : Agus Mukhlisin  
NRP : 2109100016  
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Muhammad Nur Yuniarto

**Abstrak**

Mobil listrik saat ini berpotensi untuk dikembangkan sebelum mobil listrik buatan orang asing menguasai pasar Indonesia. ITS sebagai Institusi berbasis teknologi diharapkan menjadi pionir pengembangan Mobil Listrik Nasional (Molina). Roadmap pengembangan Mobil Listrik Nasional pada tahun 2014 adalah pengujian dan pembuatan komponen Mobil Listrik secara mandiri. Salah satu komponen utama Mobil Listrik adalah *Motor* dan *Controller*-nya. Saat ini *Motor* dan *Controller* dibuat oleh bangsa asing, sehingga diperlukan *Research and Development (R&D)* terhadap komponen ini. Tugas Akhir ini berfokus pada desain dan pembuatan *Modular Controller* untuk *BLDC Motor*. *Modular Controller* adalah *Controller* yang terpisah dari sistem *Driver* maupun sistem bertegangan tinggi. Komponen *Driver* dan sistem bertegangan tinggi dapat menghasilkan panas serta induksi elektromagnetik sehingga dapat mengganggu pengkondisian sinyal dan sistem kerja *Micro Controller*.

Tujuan tugas akhir ini adalah mendesain dan membuat *Modular Controller*. *Modular Controller* ini memiliki output sinyal yang dapat menjalankan *Transistor*, *Mosfet* maupun *Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)* sehingga *Modular Controller* ini memiliki keunggulan *Multi Stage Power*. *Multi Stage Power Controller* yaitu *Controller* yang dapat digunakan pada berbagai kapasitas power tanpa mengubah *Main Controller*. *Comutation* dan *Switching* pada masing-masing *Gate Controller* ini menggunakan *Pulse Width Modulation (PWM)* dengan *Hall Effect Sensor* sebagai penentu *Comutation* dan *Feedback* putaran

Motor Listrik. Output tegangan *Throttle* masuk pada pin analog input digunakan sebagai *Speed Reference* dan sebagai target RPM Motor. Target RPM menentukan nilai *Pulse Width* melalui metode *Look Up Table*. Tabel tersebut dapat diatur menggunakan *Software Tuning Manager*, dengan memasukkan nilai arus listrik yang akan dialirkan pada putaran motor listrik tertentu. Untuk mengontrol agar RPM sesuai dengan target menggunakan *Proportional* dan *Integral Controller* (PI Controller).

Tugas Akhir ini menghasilkan *Modular Controller* yang dapat menjalankan *BLDC Motor* dengan kapasitas power bermacam-macam (teruji pada 500 Watt, 1 KW dan 2KW). *Modular Controller* ini dapat diatur ulang oleh pengguna (*Programmable*) sehingga dapat menyesuaikan dengan kondisi aplikasi, baik digunakan untuk keperluan balap maupun keperluan kendaraan harian. Pengaturan dapat dilakukan dengan memasukkan prosentase *Pulse Width Modulation* (PWM) pada tabel *Tuning Manager*. *Motor Controller* merupakan sebuah komponen penting dalam desain sistem Motor Listrik. Efisiensi Motor Listrik dapat meningkat dengan penggunaan *Controller* yang sesuai, tanpa mengubah parameter fisik pada Motor Listrik tersebut. Motor dengan menggunakan *Iquteche Controller* memiliki efisiensi maksimal 95,1 % pada putaran motor 2790 rpm sedangkan dengan *Mitsuba Controller* memiliki efisiensi maksimal 94,8 % pada 3300 rpm.

**Kata Kunci : Modular Controller, BLDC Motor, Programmable Controller**

***Design of Modular Controller 3 Phase Brushless Direct Current (BLDC) Motor Using ARM 32-Bit Cortex M-4 MCU***

Name : Agus Mukhlisin  
NRP : 2109100016  
Department : Mechanical Engineering  
Student Advisor : Dr. Ir. Muhammad Nur Yuniarto

**Abstract**

*Today, Electric cars have the potential to be developed before the electric car made foreigners dominate the Indonesian market. ITS as a institution based on technology is expected to be pioneer the development of the National Electric Cars called Molina. Roadmap development of the National Electric Cars in 2014 is testing and manufacture of electric car components independently. One of the main components of electric cars are motor and controller. Currently Motor and Controller made by foreign nations, so that the necessary research and development for this component. This final project focuses on the design and manufacture of Modular Controller for BLDC Motor. Modular Controller is a controller that is separate from the system drivers and a high-voltage system. Driver components and high-voltage systems can produce heat and electromagnetic induction so as to interfere with the signal conditioning and work systems Micro Controller.*

*The purpose of this final project is to design and create a Modular Controller. The Modular Controller has an output signal that can operate transistors, MOSFETs and Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) so that it has the advantage Modular Controller Multi Stage Power. Multi-Stage Power Controller is controller that can be used in a variety of capacities of power without changing the Main Controller. Commutation and Switching at each Gate Controller uses Pulse Width Modulation (PWM) with Hall Effect Sensor as a determinant Commutation and Feedback round Electric Motors. The output voltage on pin Throttle incoming analog inputs used as the Speed*

*Reference and as a target RPM Motor. Target RPM determine Pulse Width value through method Look Up Table. The table can be set using the Software Tuning Manager, by entering the value of the electric current will flow in particular electric motor rotation. To control the order in accordance with the target RPM using a Proportional and Integral controller (PI controller). This final project produce Modular Controller can operate BLDC Motor with an assortment of power capacity (tested at 500 Watt, 1 KW and 2KW). Modular Controller can be reset by the user (programmable) so that it can adjust to the conditions of application, whether used for racing purposes and the purposes of daily vehicle. Arrangements can be made by inserting the percentage of Pulse Width Modulation (PWM) in the table Tuning Manager. Motor Controller is an important component in the system design Electric Motors. Electric Motor efficiency can be increased with the use of an appropriate controller, without changing the physical parameters on the Electric Motor. Motor by using Iquteche controller has a maximum efficiency of 95.1% at 2790 rpm while the motor by using Mitsuba controller has a maximum efficiency of 94.8% at 3300 rpm.*

**Keyword :**

Modular Controller, BLDC Motor, Programmable Controller.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan taufik-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas akhir ini berjudul “**Perancangan Modular Controller 3 Phase Brushless Direct Current (BLDC) Motor Menggunakan ARM 32-Bit Cortex M-4 MCU**”.

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik bagi mahasiswa Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak untuk perbaikan Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan atas bantuan berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil secara langsung maupun tidak langsung, terutama kepada :

1. Teristimewa kepada Orang Tua penulis Muhyidin dan Dewi Asiyah yang selalu mendoakan, memberikan motivasi, memberikan kasih sayang dan memberikan yang terbaik buat penulis.
2. Bapak Dr. Muhammad Nur Yuniarto selaku dosen pembimbing yang tidak bosan-bosannya mengingatkan dan membimbing penulis.
3. Bapak Dr. Eng Sutikno, ST, MT, Bapak Indra Sidharta, ST, MSc dan Bapak Wahyu Wijanarko, ST, MSc selaku dosen penguji Tugas Akhir ini yang telah memberikan saran dan masukan untuk memperbaiki Tugas akhir ini.
4. Para Sahabat : Om Welly, Om Gogon, Om Max, Om Kawur, Om Abenk, Om Jarakal, partner in crime “Tono”, Bunda Pentol, Grunge, Uta-Uti, Bos Tegar, Paman Skub, Mang



Ucup, Jeng Dian, Aufar, Botol, teristimewa buat Bunda Erin, kalian semua Istimewa, terima kasih telah sabar bersama saya.

5. Semua pihak yang telah membantu penyelesaian Tugas Akhir ini.

Semoga Tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi masyarakat pada umumnya dan khususnya bagi penulis. Penulis mengucapkan mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila dalam penuisan ini terdapat kekeliruan.

Surabaya, Januari 2015  
Penulis,

Agus Mukhlisin  
NRP 2109100016

## DAFTAR ISI

	halaman
Lembar Judul .....	i
Lembar Pengesahan .....	iii
Abstrak .....	v
Kata Pengantar .....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar .....	xiii
Daftar Tabel .....	xv

### BAB I PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang Masalah .....	1
1.2	Perumusan Masalah.....	3
1.3	Batasan Masalah .....	4
1.4	Tujuan Penelitian .....	4
1.5	Relevansi dan Manfaat Hasil Penelitian .....	4

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Gambaran Umum Modular Controller .....	7
2.2	Penelitian Controller Motor Terdahulu .....	9
2.2.1	Mitsuba Motor Controller .....	9
2.2.2	Shane W. Colton, Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control ..	10
2.2.3	Jarrad Cody, <i>Regenerative Braking in an Electric Vehicle</i> .....	13
2.2.4	Freescall Semiconductor Application Note .....	18
2.3	Tuning Manager ECU I-Quteche .....	21

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Teknik / Proses Pengerjaan .....	23
3.1.1	Penentuan Spesifikasi <i>Modular Controller</i> .....	24
3.1.2	Pengumpulan Data .....	25
3.1.3	<i>Engineering Design</i> .....	26
3.1.4	Pembuatan <i>Hardware</i> dan <i>Firmware</i> .....	28

3.1.5	Pengujian <i>Input</i> dan <i>Output</i> .....	29
3.1.6	Pengujian Menggunakan BLDC Motor .....	30
3.1.7	Analisa Data .....	32
3.1.8	Validasi dan Verifikasi Desain .....	32
3.1.9	Revisi Desain .....	33
3.1.10	<i>Blueprint Modular Controller</i> .....	33
3.1.11	Penyimpulan Hasil Penelitian .....	34
3.2	Diagram Sistem Modular Controller .....	34

## **BAB I**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Blueprint Modular Controller .....	37
4.1.1	Komponen Penyusun <i>Modular Controller</i> .....	38
4.1.2	Desain Board Modular Controller .....	44
4.1.3	Pembuatan Modular Controller .....	48
4.1.4	Firmware Modular Controller .....	50
4.2	Data Hasil Pengujian dan Pembahasan .....	57
4.2.1	Pengujian Input dan Output Modular Controller ..	57
4.2.2	Data Unjuk Kerja Modular Controller .....	63
4.2.2.1	Uji Tanpa Pembebanan .....	63
4.2.2.2	Uji Dengan Pembebanan .....	64

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan .....	73
5.2	Saran .....	75

Daftar Pustaka .....	77
Biodata Penulis .....	79

## DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 1. Sinyal Hall Effect Sensor dengan Logic Drive 180°	13
Tabel 2. <i>Comutation</i> dan <i>Switching BLDC Motor</i> pada Mode <i>Forward</i> .....	15
Tabel 3. <i>Step Regenerative Braking Mode</i> .....	17
Tabel 4. Commutation Sequence untuk Rotasi Searah Jarum Jam .....	19
Tabel 5. <i>Input</i> dan <i>Output Modular Controller</i> dengan Cara Pengujiannya .....	29
Tabel 6. Variabel Penelitian untuk Membandingkan Performa Controller.....	30
Tabel 7 : STM32F303 Pin I/O Modular Controller .....	38
Tabel 8 : Bill of Material dan Bill of Quantity Modular Controller .....	47
Tabel 9 : Hasil Pengujian Tanpa Pembebanan .....	63

## DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 1.1 Nissan Leaf 2013 VS EC ITS Ver. 2 .....	1
Gambar 1.2 Roadmap Mobil Listrik Nasional.....	2
Gambar 2.1 <i>Modular Controller DC Motor</i> .....	8
Gambar 2.2 Mitsuba Schematic .....	10
Gambar 2.3 Versi Controller pada Electric Scooter ...	11
Gambar 2.4 Isolation Terhadap High Voltage .....	12
Gambar 2.5 Aliran Arus Listrik Pada Fase A dan B....	14
Gambar 2.6 Aliran Arus Listrik Step 1 Saat <i>Regenerative Braking</i> .....	16
Gambar 2.7 <i>Controlling Regenerative Braking</i> .....	17
Gambar 2.8 Voltage Stroke pada BLDC Motor .....	18
Gambar 2.9 Three Phase BLDC Motor Power Stage .	19
Gambar 2.10 a. Independent b Complementary Switching Power Transistor .....	20
Gambar 2.11 Tampilan Tuning Manager ECU I-Quteche .....	21
Gambar 2.12 Setting Parameter pada Tuning Manager Iquteche .....	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir .....	23
Gambar 3.2 : Skema Pengujian Motor Listrik dengan Pembebanan Lampu .....	31
Gambar 3.3 Block Diagram Modular Controller .....	34
Gambar 4.1 Arcitecture Modular Controller .....	37
Gambar 4.2 Skematik Minimum Sistem STM32F303	40
Gambar 4.3 Skematik Regulator 5 dan 3.3 Volt DC ..	41
Gambar 4.4 Skematik Signal Conditioning Hall Effect Sensor .....	41
Gambar 4.5 Skematik Devider Analog Input .....	42
Gambar 4.6 Driver Output Modular Controller .....	43
Gambar 4.7 Skematik USB to Serial Menggunakan	

FTDI .....	44
Gambar 4.8 Lay Out PCB Modular Controller .....	44
Gambar 4.9 PCB Layer 1 (Bawah) Modular Controller .....	45
Gambar 4.10 PCB Layer 2 Modular Controller .....	45
Gambar 4.11 PCB Layer 3 Modular Controller .....	46
Gambar 4.12 PCB Layer 4 (Atas) Modular Controller .....	46
Gambar 4.13 PCB Modular Controller Iquteche .....	47
Gambar 4.14 Hasil Assembly Modular Controller Iquteche .....	49
Gambar 4.15 Flowchart Program Modular Controller .....	50
Gambar 4.16 Pengkondisian Hall Effect Sensor Mitsuba Controller .....	57
Gambar 4.17 Pengkondisian Hall Effect Sensor pada Iquteche Controller Versi 1 .....	58
Gambar 4.18 Pengkondisian Hall Effect Sensor pada Iquteche Controller Versi 2 .....	59
Gambar 4.19 Pengkondisian Hall Effect Sensor pada Iquteche Controller Versi 3 .....	60
Gambar 4.20 Sinyal Output 74HC14 pada Mitsuba Controller dan Iquteche Controller.....	60
Gambar 4.21 Perbandingan Output Micro Controller dengan Sinyal pada Gate Mosfet .....	61
Gambar 4.22 Grafik Power Input vs Putaran Motor dengan Iquteche Controller dan Mitsuba Controller....	65
Gambar 4.23 Grafik Power Output Efektif vs Putaran Motor Iquteche Controller dan Mitsuba Controller .....	66
Gambar 4.24 Grafik Effisiensi vs Putaran Motor Iquteche Controller dan Mitsuba Controller.....	67
Gambar 4.25 Grafik Torque vs Putaran Motor Iquteche Controller dan Mitsuba Controller.....	68
Gambar 4.26 Grafik Karakteristik Motor Uji .....	69
Gambar 4.27 : Tunning Manager Iquteche Controller .....	71
Gambar 5.1 : Spesifikasi Modular Controller Iquteche .....	73
Gambar 5.2 : Desain PCB Modular Controller Iquteche .....	74

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Mobil listrik saat ini berpotensi untuk dikembangkan sebelum mobil listrik buatan orang asing menguasai pasar Indonesia. Mobil listrik sangat populer pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20, tetapi popularitasnya menurun karena teknologi *Internal Combustion Engine* semakin maju dengan harga yang semakin murah. Krisis energi pada tahun 1970 – 1980 membangkitkan minat terhadap pemakaian mobil listrik, tetapi baru pada tahun 2000 produsen memberi perhatian serius pada kendaraan ini. Karena harga minyak yang melambung tinggi dan masyarakat mulai sadar akan buruknya dampak emisi gas buang. Mobil listrik paling laris di dunia sampai bulan November 2011 adalah Nissan Leaf. Mobil listrik tipe city car ini terjual lebih dari 20.000 unit di seluruh dunia.

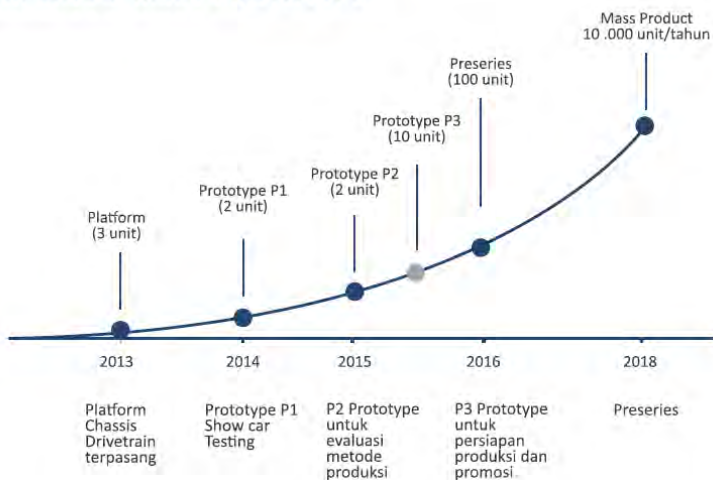


Gambar 1.1 Nissan Leaf 2013 VS EC ITS Ver. 2

ITS sebagai institusi berbasis teknologi diharapkan menjadi pioner pengembangan Mobil Listrik Nasional (Molina).

Pada tahun 2013 ITS telah me-*launching* 2 mobil listrik yang diberi nama Ezzy ITS. Ezzy ITS memiliki desain *Sporty* setara dengan mobil mewah saat ini (terlihat pada gambar 1.1). Hal ini menunjukkan bahwa sebenarnya bangsa Indonesia mampu mengembangkan mobil listrik. Ezzy ITS merupakan *Master Piece* penelitian sebagai acuan pengembangan Molina. Roadmap pengembangan mobil listrik tahun 2014 ini (sesuai pada gambar 1.2) adalah *Testing* dan pembuatan komponen secara mandiri, sehingga mendukung program swasembada teknologi. Komponen utama mobil listrik adalah Motor dan Controllernya, sehingga diperlukan *Research and Development* (R&D) terhadap komponen ini.

### ROADMAP RISET PROTOTYPE



Gambar 1.2 Roadmap Mobil Listrik Nasional  
(Kemendikbud, 2012)

*Motor Controller* pada mobil listrik saat ini sudah sangat berkembang, namun belum ada produk buatan Indonesia. [Colin Knight](#) pada tahun 2013 membuat paten dengan topik *Programmable Portable Power Tool with Brushless DC Motor*. *Controller* ini dapat di-*programm* dengan men-*setting* parameter



RPM, *Torque*, *Current Value* dll. [Rachid G. Abou-Kasm](#) dkk pada tahun 2013, membuat paten tentang *Universal Control Unit* untuk *Brushed* maupun *Brushless DC Motor*. *Controller* ini memiliki dua algoritma, sehingga dapat menjalankan *Brushed* atau *Brushless DC Motor*. Sedangkan, Jiang Guohui pada tahun 2013 menulis paten dengan topik *DC Brushless Motor Control System*. *Controller* ini terdiri dari *Peripheral Circuit*, *Drive Circuit*, *Transistor Switch Circuit*, *Output Signal* and *Programmable Read-Only Memory*. Keseluruhan bagian *controller* tersebut ter-*package* menjadi satu.

*Controller* yang akan dikembangkan dalam tugas akhir ini adalah *Modular Controller*, yaitu *Controller* yang terpisah dari sistem driver maupun High Voltage Regulator. Sistem *Modular Controller* sebenarnya sudah dijumpai pada *Electronic Control Unit* (ECU) di motor injeksi, sehingga lebih minimal dan flexible. Pada dasarnya sensor dan actuatornya terinstall secara external ECU tersebut. Aplikasi pada *Controller* BLDC actuatornya berupa IGBT ataupun *Driver Mosfet* sehingga level tegangan output *Microcontroller* pada dasarnya sama. Kapasitas *Motor DC Controller* berbeda pada sisi IGBT maupun Mosfetnya. Sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut terkait **Perancangan Modular Controller 3 Phase Brushless Direct Current (BLDC) Motor Menggunakan ARM 32-Bit Cortex M-4 MCU**.

## 1.2 Perumusan Masalah

Tugas akhir ini fokus pada pengembangan 3 *Phase Brushless DC Motor Controller* secara modular. Rumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimanakah membuat *Modular Controller 3 Phase Brushless DC Motor* dengan algoritma *Switching* yang sesuai agar dapat diaplikasikan pada motor dengan daya yang bervariasi?
2. Bagaimanakah perbandingan performa *Modular 3 Phase Brushless DC Motor Controller* dengan *controller* lainnya?

### 1.3 Batasan Masalah

Agar tugas akhir ini sesuai dengan tujuan penelitian maka diperlukan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. *3 Phase Brushless DC Motor* yang dimaksud memiliki *Hall Effect Sensor* sebagai estimasi posisi rotor.
2. Performa *Controller* tersebut dibandingkan dengan *Mitsuba Controller M2096D2*.
3. Motor listrik yang diuji menggunakan *Brushless DC Motor* dengan daya 2 KW.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan perancangan dan pembuatan *Modular 3 Phase Brushless DC Motor Controller* ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang dan membuat *Modular Controller 3 Phase Brushless DC Motor* dengan algoritma *Switching* yang sesuai agar dapat diaplikasikan pada motor dengan daya yang bervariasi.
2. Mengetahui perbandingan performa *Modular 3 Phase Brushless DC Motor Controller* dengan controller lainnya.

### 1.5 Relevansi dan Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh pada saat atau setelah perancangan dan pembuatan *Modular 3 Phase Brushless DC Motor Controller* dilakukan adalah :

1. Sisi Ekonomi

*Modular Controller* ini menggunakan *Power Supply* 12 Volt dari DC/DC Converter yang sudah tersedia pada komponen mobil listrik. Sehingga tidak diperlukan lagi *High Voltage Converter* dan mengurangi pemakaian komponen. Hal ini menghemat biaya produksi pembuatan controller ini. *Modular Controller* yang flexible untuk berbagai daya motor tentunya akan memiliki potensi pasar yang sangat baik.

2. Sisi Iptek

Mendukung program pemerintah dalam swasembada Teknologi. Indonesia sebenarnya mampu membuat dan bersaing

---

pada industri mobil listrik. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi acuan maupun rujukan dalam penelitian-penelitian selanjutnya. Hasil penelitian ini memiliki potensi besar untuk dapat dipatenkan dari sisi *Modular Controller* yang saat ini belum ada dipasaran.

### 3. Sisi Manfaat Masyarakat

Memberikan syiar ke masyarakat bahwa teknologi yang dikembangkan anak Bangsa sebenarnya tidak kalah dengan produk luar negeri. Sehingga menanamkan pada masyarakat untuk lebih cinta terhadap produk lokal Indonesia. Masyarakat dapat dengan mudah mengoperasikan Mobil Listrik Nasional.

### 4. Sisi Penulis

Mengimplementasikan secara langsung ilmu pengetahuan yang didapatkan dari bangku perkuliahan melalui kegiatan penelitian yang membantu perkembangan Mobil Listrik Nasional.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

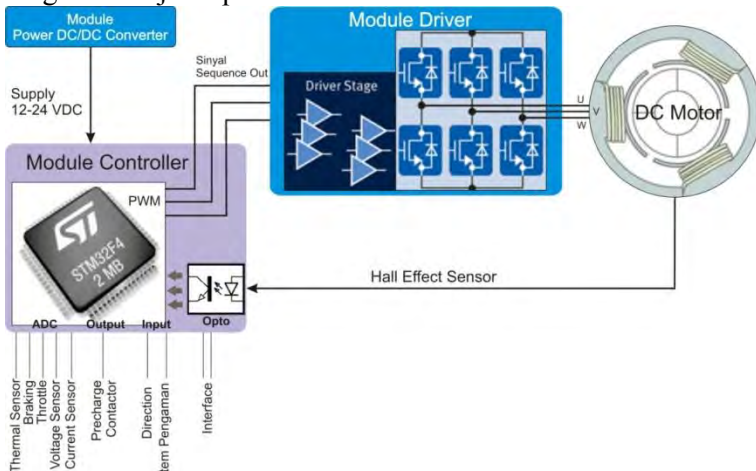
#### **2.1 Gambaran Umum Modular Controller**

Umumnya controller Brushless DC motor terdiri dari beberapa komponen berikut :

- a. *Electronic Control Unit (ECU)* yang berfungsi sebagai pengatur kerja driver actuator. Terdiri dari input dan output sinyal. Input pada *Controller Motor* meliputi sinyal *Hall Effect Sensor* (dari motor), *Throttle*, *Direction*, *Braking*. Sedangkan Output berupa sinyal *Pulse Witdh Modulation (PWM)*, Analog output RPM (0-5 Volt).
- b. *Power Regulator* yang berfungsi untuk menyediakan *Supply Power ECU* agar dapat berporasi sesuai dengan tegangan kerjanya. Biasanya regulator yang digunakan sejenis *Step Down Regulator* dengan metode *Switching*.
- c. *Driver* yang berfungsi menjalankan sinyal yang diterima dari ECU untuk diteruskan ke Pole Motor. Pada motor berkapasitas menengah kebawah biasanya menggunakan *Module Half Bridge Circuit* dengan komponen Mosfet, sedangkan untuk motor berkapasitas besar (10 KW – keatas) biasanya memakai *Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)*.
- d. Interface berfungsi untuk memonitor kondisi operasi controller agar user dapat mengetahui apakah sistem berjalan dengan normal. Komunikasi data dapat menggunakan Serial data, I2C, USART, maupun CAN communication.

ITS sebagai salah satu Institut berbasis Teknologi telah memiliki basic controller yang cukup kuat, hal ini ditunjukkan dengan berbagai capaian yang telah ditunjukkan ke media publik. Salah satu buktinya adalah berdirinya PT. I-quteche Indonesia yang telah berhasil memproduksi Engine Control Unit (ECU) untuk mesin Injeksi. Kompetensi ini dapat diaplikasikan untuk merancang sistem control pada Brushless DC Motor. Pada

dasarnya mengontrol motor listrik memiliki kemiripan dengan mengontrol Injeksi pada Motor Bensin.



Gambar 2.1 *Modular Controller DC Motor*

Controller Brushless DC Motor saat ini terdiri dari beberapa module menjadi satu kesatuan yang kompleks. Ada beberapa komponen yang sebenarnya sudah ada yang menjalankan fungsinya tetapi tetap ada. Misalnya supply untuk microcontroller, biasanya terdapat switching regulator untuk menurunkan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah. Padahal fungsi tersebut sudah terdapat pada DC/DC converter. Untuk menghindari hal tersebut dan membuat controller yang simple perlu modular controller ini.

Modular controller ini menggunakan STM32F4 ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU yang merupakan micro controller yang memiliki feature sangat mendukung pada implementasi controller Motor Listrik. Access speed data sudah mencapai 32-bit dengan External Clock 16MHz menjadikan modular controller ini mampu mengambil data sampling sangat banyak dengan waktu yang super cepat, sehingga data yang diproses akurat. Selain itu micro controller ini memiliki ADC 12 bit sehingga hasil pengukuran

---

data akan semakin teliti. Featur ini didukung dengan Operating System yang sudah menggunakan Real Time OS (RT-OS). Sehingga proses algoritma pada controller ini memiliki delay yang sangat kecil. RT-OS controller ini menggunakan Chibi-OS yang sudah cukup populer saat ini, namun Open Source operasinya masih sangat terbatas. Untuk mengatasi masalah tersebut tugas akhir akan menggunakan Hybrid OS yaitu menggabungkan chibi-OS dengan standard Library STM32 dari Source Code ST.

## **2.2 Penelitian Controller Motor Terdahulu**

Penelitian mengenai BLDC Motor sudah banyak dilakukan, perkembangannya dilakukan baru-baru ini. Agar penelitian ini tidak dimulai dari awal, maka diperlukan studi literatur perkembangan BLDC Motor Controller saat ini. Berikut beberapa referensi yang dapat dijadikan acuan dalam penelitian ini :

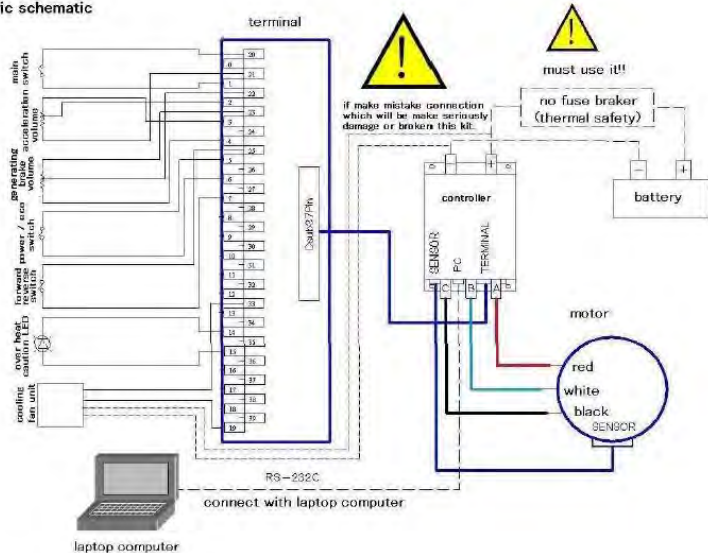
### **2.2.1 Mitsuba Motor Controller**

Modular Controller ini, memiliki tujuan utama yaitu untuk dapat diaplikasikan pada Mitsuba Motor sehingga harus dapat menggantikan Mitsuba Controller. Sebagai dasar perancangan Controller ini maka referensi dari Mitsuba Controller sangat diperlukan, agar dapat mengenal betul karakteristik objek yang akan dikontrol. Berikut beberapa spesifikasi dan informasi penting terkait Mitsuba Controller :

1. Memerlukan power yang sangat kecil untuk mengoperasikan Controller ini.
2. Arus dapat dikontrol melalui manual PWM yang dilengkapi dengan selector.
3. Pengguna dapat mengubah beberapa parameter sesuai dengan kebutuhan.
4. Memiliki efisiensi yang tinggi dalam aplikasi *Regenerative Braking*.

5. Menggunakan potentiometer (5k $\Omega$  - 10 k $\Omega$ ) untuk acceleration volume
6. Terdapat signal Output analog untuk memberikan informasi RPM Motor.

electric schematic

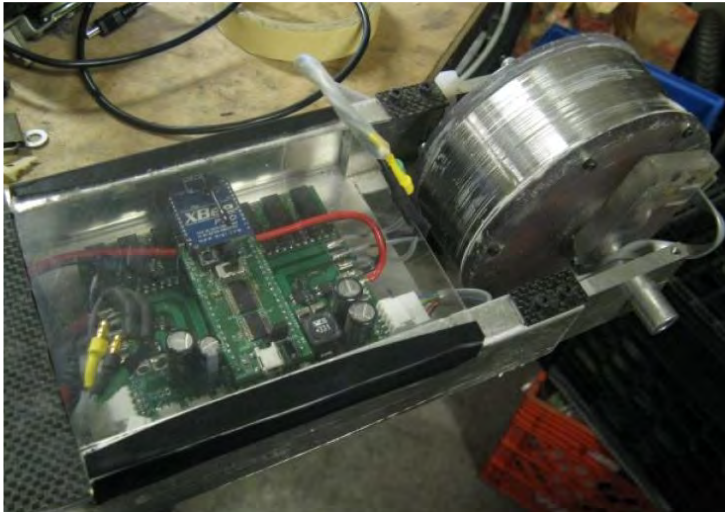


Gambar 2.2 Mitsuba Schematic (Mitsuba, 2013)

### 2.2.2 Shane W. Colton, Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control

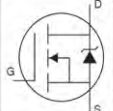
Motor Controller adalah sebuah senjata rahasia dalam desain sistem Electric Motor. Effisiensi Motor Listrik dapat meningkat dengan penggunaan Controller yang sesuai, tanpa mengubah parameter fisik pada Motor Listrik tersebut. Biaya pengembangan Controller Motor jauh lebih murah dibandingkan dengan mengubah fisik Motor Listrik, sehingga pengembangan Controller Motor sangat menarik untuk dilakukan. Shane W. Colton merancang Controller yang digunakan untuk *Two-Wheel-Drive Electric Kick Scooter* (sesuai dengan gambar 2.3).





Gambar 2.3 Versi Controller pada Electric Scooter  
(Shane W. Colton, 2008)

Controller ini menggunakan International Rectifier IRFB3077PbF MOSFET. MOSFET merupakan saklar semikonduktor yang dapat digunakan sebagai driver pengendali Motor Listrik. Banyak MOSFET modern memiliki nilai resistansi yang sangat rendah, sehingga Densitas Power yang besar dapat memakai Controller dengan dimensi yang kecil. Tipe MOSFET ini dapat dijadikan referensi pemakaian driver motor dengan spesifikasi sebagai berikut :

	$V_{DS}$	75V
	$R_{DS(on)}$ typ.	2.8m $\Omega$
	max.	3.3m $\Omega$
	$I_D$ (Silicon Limited)	210A ①
	$I_D$ (Package Limited)	120A

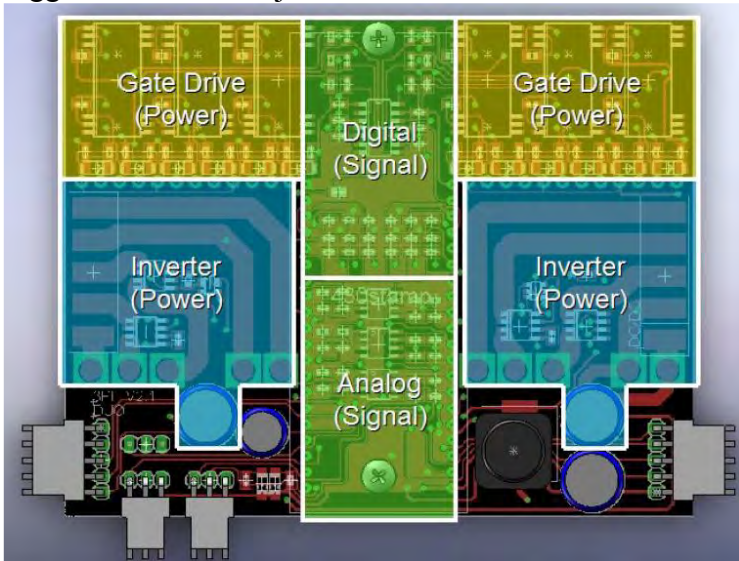
Gate Threshold Voltage : 2 Volt (Min), 4 Volt (Max)

Turn-On delay time : 25 ns

Rise Time : 87 ns

Turn-Off delay time : 69 ns

Power dan sinyal pada Printed Circuit Board (PCB) sebisa mungkin terisolasi dengan baik. Banyak kegagalan terjadi karena jalur Power membuat gangguan pada sinyal. Yang paling penting adalah arus yang mengalir melalui motor seharusnya tidak menyeberang pada sinyal ataupun *Ground* (gambar 2.4 menunjukkan isolasi controller ini). Modular controller ini merupakan solusi agar gangguan ini tidak terjadi.



Gambar 2.4 Isolation Terhadap High Voltage  
(Shane W. Colton, 2008)

Informasi penting yang dapat dijadikan acuan pada penelitian ini adalah terkait sinyal pada *Hall Effect Sensor*. Transisi Hall menetapkan indeks awal. Controller ini memiliki 6 state posisi (selisih  $60^\circ$ ) dengan logic digital sebagai berikut :

Tabel 1 : Sinyal Hall Effect Sensor dengan Logic Drive 180°

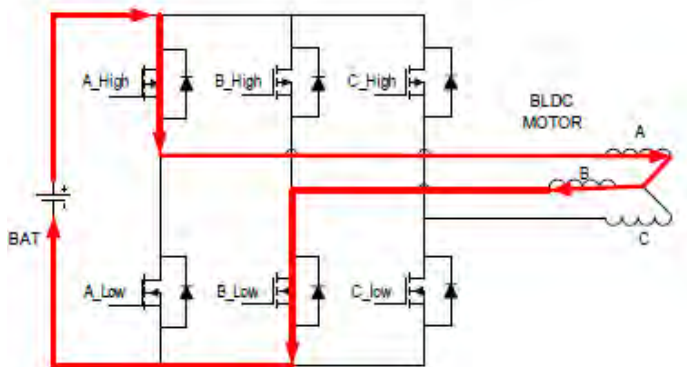
Relative Phase Angle	Signal State	180° Shift
0°	001	110
60°	011	100
120°	010	101
180°	110	001
240°	100	011
300°	101	010

Sumber : Shane W. Colton, 2008

### 2.2.3 Jarrad Cody, *Regenerative Braking in an Electric Vehicle*

Penelitian yang dilakukan Jarrad Cody, dkk dari *University of South Australia* menurut penulis dapat dijadikan referensi pengembangan BLDC Motor dengan *Regenerative Braking*. Penelitian ini dapat diterapkan mengingat konstrain bahwa desain Modular Controller ini akan digunakan untuk mengontrol Motor Sapu Angin Surya, dimana membutuhkan manajemen energi yang baik. Salah satu cara untuk menghemat penggunaan energi adalah dengan penggunaan *Regenerative Braking* untuk pengereman yang nantinya energi pengereman dirubah menjadi listrik dan disimpan kembali ke baterai.

Jarrad Cody menunjukkan cara kerja Motor Controller dengan ilustrasi Gambar 2.5 . Pada Motor BLDC tiga fase, sepasang fase harus diaktifkan secara sequensial dengan urutan yang benar agar terjadi putaran yang diinginkan. Pada ilustrasi tersebut menunjukkan Fase A dan Fase B aktif sedangkan fase C *Not Connected* (NC). Kondisi seperti ini mengakibatkan terjadinya aliran arus listrik dari fase A menuju ke fase B, sehingga kumparan A dan B terjadi induksi elektromagnetik.



Gambar 2.5 Aliran Arus Listrik Pada Fase A dan B  
(Jarrad Cody, 2009)

Cara untuk mengontrol aliran arus adalah switching pada fase/kutub diatur dengan *Pulse Width Modulation* (PWM). Commutation dan Switchingnya harus tepat agar putaran yang dihasilkan saling mendukung.

Berikut ini merupakan tabel 2 *Comutation* dan *Switching* untuk mode Forward :

Tabel 2. *Comutation* dan *Switching BLDC Motor* pada Mode *Forward*

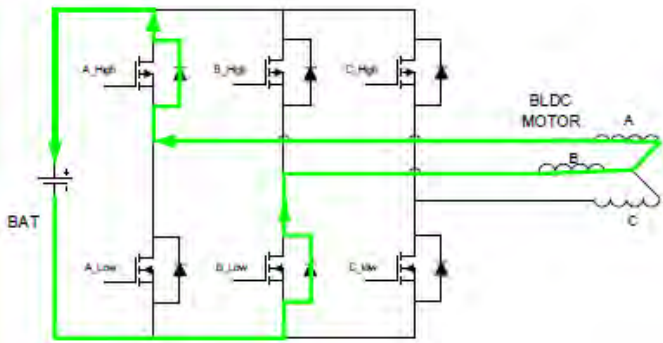
Forward/Clockwise Motoring Commutation Sequence						
Step	Hall A	Hall B	Hall C	Phase A	Phase B	Phase C
1	1	0	0	-V	+V	NC
2	1	0	1	NC	+V	-V
3	0	0	1	+V	NC	-V
4	0	1	1	+V	-V	NC
5	0	1	0	NC	-V	+V
6	1	1	0	-V	NC	+V

Forward/Clockwise Motoring Inverter Operation			
Step	PWM Switch	ON Switch	OFF Switch
1	B_High	A_Low	Remaining
2	B_High	C_Low	Remaining
3	A_High	C_Low	Remaining
4	A_High	B_Low	Remaining
5	C_High	B_Low	Remaining
6	C_High	A_Low	Remaining

Sumber : Jarrad Cody, 2009

*Regenerative Braking* dapat dicapai dengan mengembalikan arus ke baterai saat motor mengalami perlambatan, motor pada saat ini bertindak sebagai generator. Hal yang sama pada saat motor diputar, pada mode *Regenerative Braking* juga menggunakan metode switching melalui PWM. Ilustrasi aliran arus saat *Regenerative Braking* dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.6 Aliran Arus Listrik Step 1 Saat *Regenerative Braking*  
(Jarrad Cody, 2009)

Seperti halnya saat mode *Forward* motor, mode *Regenerative Braking* juga memiliki step-step yang harus diperhatikan urutan stepnya.

Berikut step pada saat *Regerative Braking* :

Tabel 3. *Step Regenerative Braking Mode*

Forward/Clockwise Regenerative Inverter Operation			
Step	PWM Switch	ON Switch	OFF Switch
1	A_Low	NIL	Remaining
2	C_Low	NIL	Remaining
3	C_Low	NIL	Remaining
4	B_Low	NIL	Remaining
5	B_Low	NIL	Remaining
6	A_Low	NIL	Remaining

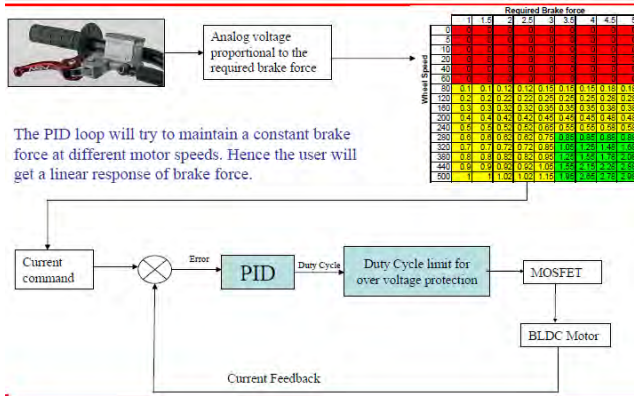
  

Reverse/Anticlockwise Regenerative Inverter Operation			
Step	PWM Switch	ON Switch	OFF Switch
1	B_Low	NIL	Remaining
2	C_Low	NIL	Remaining
3	C_Low	NIL	Remaining
4	A_Low	NIL	Remaining
5	A_Low	NIL	Remaining
6	B_Low	NIL	Remaining



Sumber : Jarrad Cody, 2009

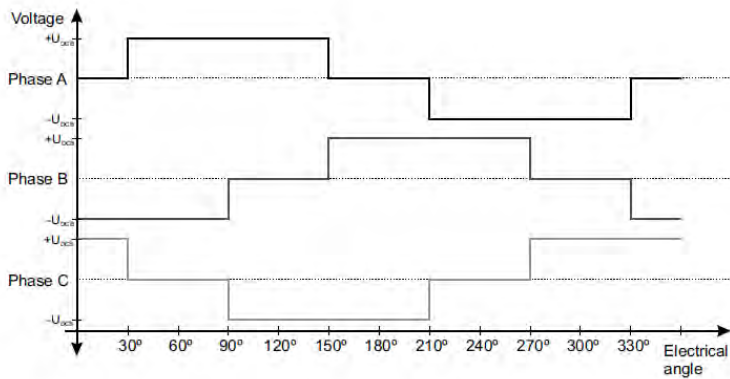
Berikut referensi logic Regenerative Braking yang dapat diaplikasikan pada modular Controller ini :



Gambar 2.7 *Controlling Regenerative Braking*  
(NEC Manual, 2006)

## 2.2.4 Freescale Semiconductor Application Note

*Freescal Semiconductor* mengeluarkan produk *Digital Signal Controller* dengan tipe kode 56800/E. *Fluks Stator*, yang dihasilkan dari induksi elektromagnetik kumparan, berinteraksi dengan *Fluks Rotor* yang dihasilkan oleh magnet rotor, dapat menggambarkan besarnya torsi dan kecepatan motor. Stroke harus diterapkan dengan benar untuk sistem 3-phase sehingga sudut antara fluks stator dan fluks rotor adalah  $90^\circ$  untuk torsi maksimum yang dihasilkan. Ini berarti motor memerlukan kontrol elektronik untuk operasi yang tepat. Leonard N. Elevich merumuskan Stroke pada masing-masing fase sebagai berikut :

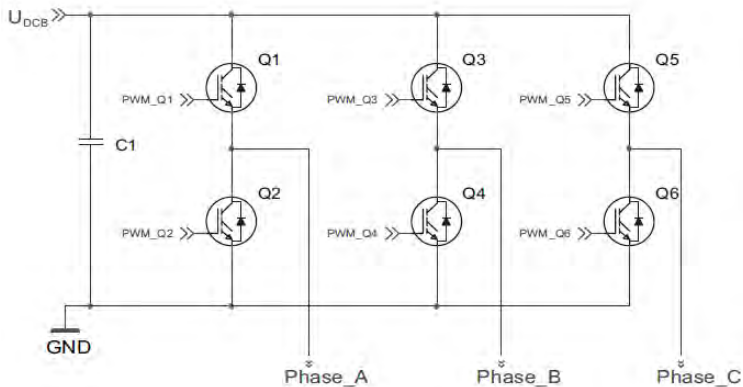


Gambar 2.8 Voltage Stroke pada BLDC Motor  
(Leonard N. Elevation, 2005)

Agar memperoleh Stroke di atas dia menggunakan *Half Bridge Transistor Power* yang dioperasikan secara sequensial. Pada prinsipnya semua driver BLDC Motor menggunakan rangkaian ini, namun yang membedakan adalah stage power yang mampu dioperasikan pada driver tersebut. Teknologi saat ini sudah sangat berkembang dengan menghadirkan Insulated gate Bipolar Transistor (IGBT) sehingga Motor Controller dapat mengontrol Motor dengan power yang sangat besar bahkan hingga 1200Volt, 650 A.



Berikut driver *Half Bridge Transistor* yang dimaksud :



Gambar 2.9 Three Phase BLDC Motor Power Stage  
(Leonard N. Elevich, 2005)

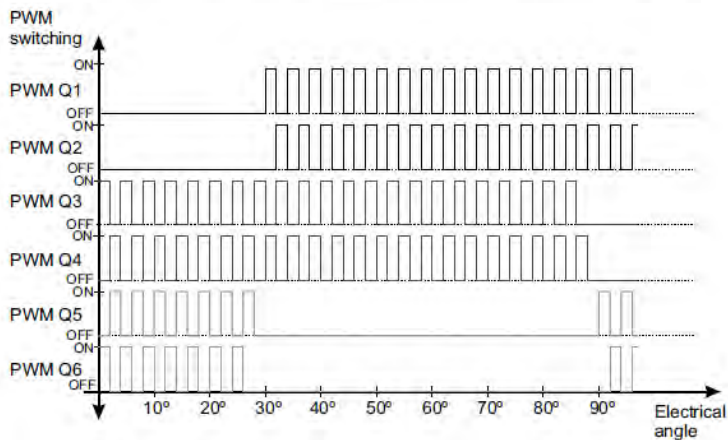
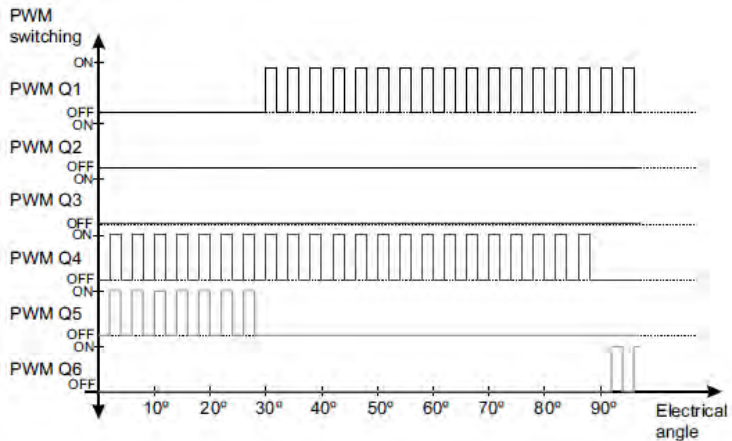
Comutation untuk Power Stage tersebut dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4. Commutation Sequence untuk Rotasi Searah Jarum Jam

Hall Sensor A	Hall Sensor B	Hall Sensor C	Phase A	Phase B	Phase C
1	0	0	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$	NC
1	0	1	NC	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$
0	0	1	$+V_{DCB}$	NC	$-V_{DCB}$
0	1	1	$+V_{DCB}$	$-V_{DCB}$	NC
0	1	0	NC	$-V_{DCB}$	$+V_{DCB}$
1	1	0	$-V_{DCB}$	NC	$+V_{DCB}$

Sumber : Leonard N. Elevich, 2005

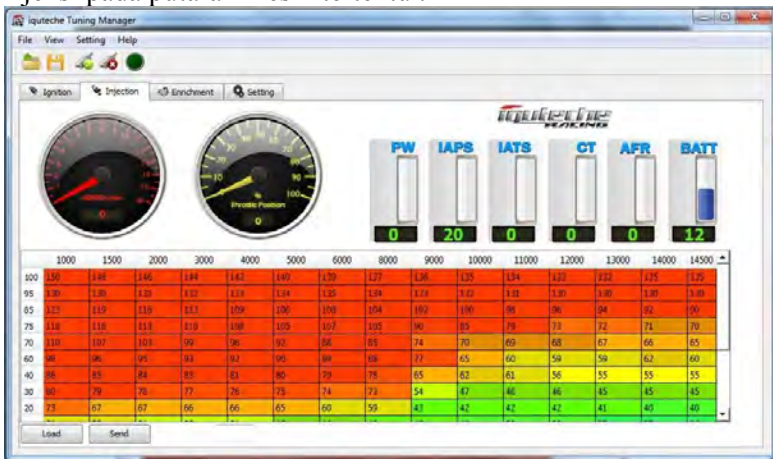
Comutation Sequence tersebut dapat diperoleh melalui Switching Transistor dengan 2 tipe berikut :



Gambar 2.10 a. Independent b Complementary Switching Power Transistor  
(Leonard N. Elevich, 2005)

### 2.3 Tuning Manager ECU I-Quteche

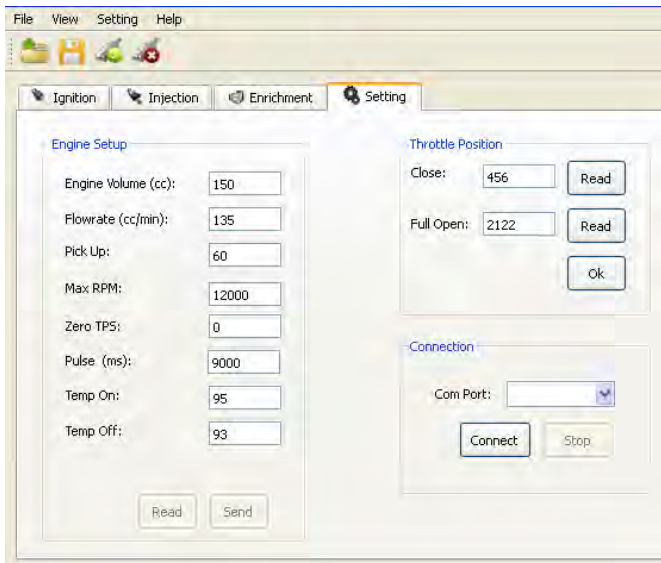
**Iquteche** memberikan kebebasan untuk mengubah setting motor injeksi. Iquteche tidak hanya hanya *ECU (Engine Control Unit)*, tetapi Engine Management System, dimana pengguna dapat memonitor nilai sensor, putaran mesin, durasi injeksi, sudut pengapian, dan kondisi mesin secara aktual, sehingga memudahkan setting injeksi. Berikut tampilan *Tuning Manager* ECU I-Quteche yang dapat dilakukan perubahan parameter durasi injeksi pada putaran mesin tertentu :



Gambar 2.11 Tampilan Tuning Manager ECU I-Quteche  
(indomekatronika.com)

Iquteche memiliki fitur dapat disetting sesuai dengan karakteristik mesin melalui setting parameter. Algoritma ini dapat digunakan pada desain Modular Controller ini sehingga Controller ini dapat digunakan sesuai dengan spesifikasi motor listrik yang digunakan. Setting parameter digunakan sebagai proteksi terhadap penggunaan motor listrik sehingga motor listrik tidak mengalami kerusakan.

Berikut tampilan Setting parameter pada *Tuning Manager Iquteche* :



Gambar 2.12 Setting Parameter pada Tuning Manager Iquteche(indomekatronika.com)

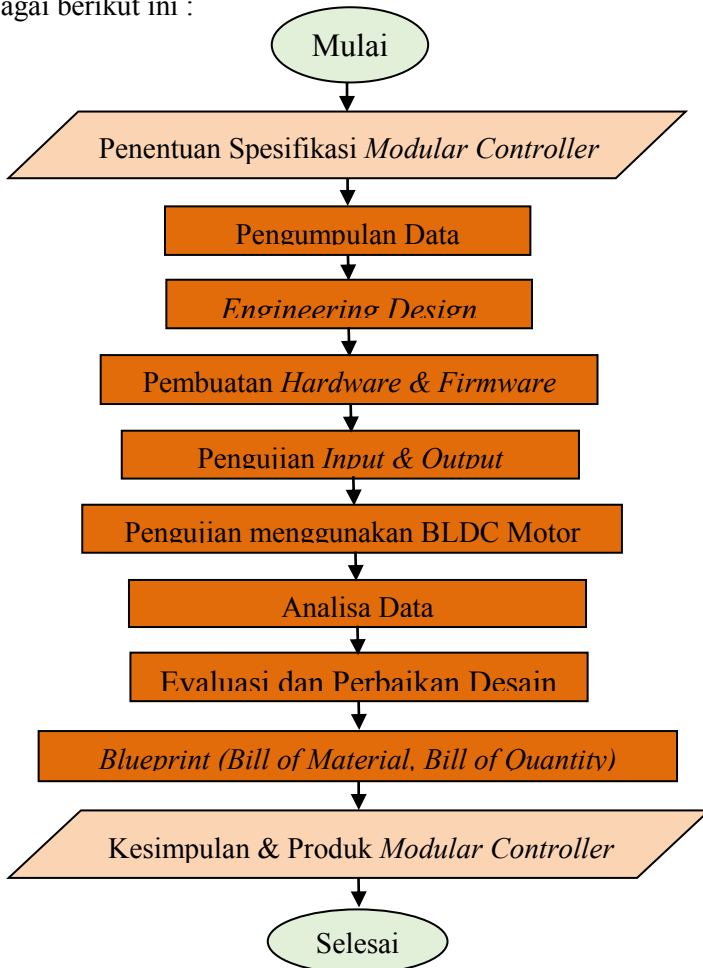
Modular Controller ini menggunakan sistem Tuning Manager ECU Iquteche dengan merubah parameter setting sesuai dengan keperluan BLDC Motor. Pada putaran Motor Listrik tertentu, pengguna dapat mensetting nilai arus yang dialirkan sehingga performa motor dapat dioptimalkan sesuai dengan kondisi yang diinginkan, baik untuk racing maupun untuk memperoleh efisiensi motor terbaik. Nilai tersebut merupakan data presentase (%) durasi *Switching Drive Module* sesuai dengan Throttle dan RPM Motor Listrik. Presentase yang dimasukkan adalah presentase dari nilai *Pulse Width* yang dapat mempengaruhi besarnya arus listrik yang dialirkan ke motor listrik.

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Teknik / Proses Pengerjaan

Proses pengerjaan Tugas Akhir ini sesuai dengan Diagram Alir sebagai berikut ini :



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir

Tugas akhir ini menggunakan metode Penelitian dan Pengembangan atau *Research and Development (R&D)*. R&D adalah rangkaian proses atau langkah-langkah dalam rangka mengembangkan suatu produk baru atau menyempurnakan produk yang telah ada. Proses ini merupakan metode penelitian yang cukup ampuh untuk memperbaiki praktek (Surya Dharma, 2008). **Tugas akhir ini akan mendesain dan membuat 3 Phase Brushless DC Motor Controller secara Modular. Berikut penjelasan secara detail proses pengerjaan Tugas Akhir ini :**

### 3.1.1 Penentuan Spesifikasi Modular Controller

Penentuan spesifikasi *Modular Controller* ini dilakukan untuk memfokuskan R&D yang akan dilaksanakan agar tidak melenceng dari tujuan awal. *Controller* ini diharapkan memiliki spesifikasi sesuai dengan perkembangan teknologi saat ini. Referensi spesifikasi *Controller* lainnya sangat diperlukan sebagai kajian penelitian ini. Berikut beberapa spesifikasi yang perlu diperhatikan dalam mendesain *Modular Controller* ini :

1. Menggunakan STM32ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU.
2. *Power Gate Signal* dapat mengoperasikan driver *Transistor*, *Mosfet* maupun *Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)*.
3. *Power Supply* menggunakan range tegangan 12-24 Volt DC. Tegangan *Supply* tersebut disesuaikan dengan *Regulator* menjadi 5 Volt dan 3,3 Volt DC .
4. *Analog Input* memiliki range 0-5 Volt DC. Berikut beberapa aplikasi yang dapat digunakan pada pin ini : *Thermal Measurement*, *Braking Potentiometer*, *Throttle Potentiometer*, *Current and Voltage Sensor* dan 2 pin alternatif analog input yang dapat diprogram sesuai keperluan.
5. Tegangan dan arus terukur, parameter ini dapat digunakan sebagai pengaman motor. *Modular Controller* ini dilengkapi dengan fitur pengamanan terhadap *Over-current* dan *Over-voltage* yang dapat diprogram. Parameter ini akan mempengaruhi terhadap limiter RPM.

- 
6. *Digital Input* dan *Digital Output* menggunakan level tegangan 12 Volt DC.
  7. Terdapat 3 *Digital Output* untuk *Contact*or yaitu main *Contact*or, *Safety Contact*or dan *Charge contact*or. Untuk menghindari *Spark* saat *Contact High Voltage* dilengkapi *Digital Output* relay 12 Volt yang terintegrasi dengan *Safety Contact*or .

### 3.1.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan hal fundamental dalam suatu penelitian. Penelitian hendaknya menggunakan basik penelitian sebelumnya yang sudah teruji sehingga tidak mengulangi dari awal. Pengumpulan data dapat dilakukan dengan cara :

- a. Studi literatur merupakan proses pencarian data maupun referensi yang digunakan sebagai acuan untuk mengembangkan *Controller* ini. Data yang diperoleh antara lain adalah prinsip kerja *3 Phase Brushless DC Motor*, *Basic Controller 3 Phase Brushless DC Motor*, Skematik digital *Input* dan *Output* untuk aplikasi pada *controller* motor maupun hal-hal lain yang menunjang penelitian ini seperti *sensor-sensor* yang digunakan.
- b. Observasi pada *controller* yang sudah ada, selain itu observasi juga dilakukan pada sistem mobil listrik. Harapannya *Controller* yang dikembangkan dapat mengikuti sistem mobil listrik yang sudah ada sehingga penggunaan *Modular Controller* ini tidak merubah sistem utama mobil listrik. Observasi pada *controller* yang sudah ada diperoleh skematik *input* dan *output* *controller* yang dapat dijadikan acuan pengembangan *Modular controller* ini.
- c. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui sinyal input dan output serta parameter lain. Sinyal tersebut dapat digunakan sebagai referensi algoritma pada *Microprocessor* yang digunakan.

### 3.1.3 Engineering Design

Desain maupun *Model Modular Controller* ini dirancang berdasarkan beberapa unit sesuai dengan fungsinya. Modular controller ini dapat digunakan pada *Multi driver*, yaitu driver motor dengan Transistor, Mosfet maupun IGBT. Sehingga output yang dihasilkan pada controller ini harus dapat men-drive komponen tersebut. Berikut desain skematik yang terdapat dalam modular controller ini :

#### a. Power Regulator

*Power Regulator* merupakan sumber tenaga yang dibutuhkan suatu rangkaian elektronika untuk dapat beroperasi. Power regulator ini digunakan untuk men-supply *microcontroller STM32F4*, rangkaian penguat *Hall Effect Sensor*, *LEM DAHB Current transducer*, *Power output driver*, *Throttle power*, *Analog input regenerative braking*. Pada rangkaian *Power supply* digunakan IC *regulator* untuk menghasilkan tegangan yang diinginkan. Modular Controller ini menggunakan 3 variasi nominal tegangan yaitu 3,3 Volt, 5 Volt dan 12 Volt. IC *regulator* yang umum digunakan adalah *LM7805* untuk supply 5 Volt dan *LD117AS33TR* untuk supply 3,3 Volt DC.

#### b. Minimum System STM32

*Minimum System STM32* merupakan rangkaian minimum agar *Microcontroller STM32* dapat beroperasi sesuai dengan spesifikasinya. *Microcontroller STM32 ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU* ini mempunyai beberapa kelebihan yaitu 128 KB *Flash Memory*, *CPU Clock up to 72 MHz.*, 16 *Channel internal Analog to Digital Converter (ADC)* dengan resolusi 12 bit serta terdapat *Internal Pulse Width Modulation (PWM)* didalamnya. *Register* yang dipakai pada *Modular Controller* ini adalah :

1. ADC untuk membaca *Analog Input* dari *Throttle*, *Current Transducer*, *Input Regenerative Braking*, dan *Analog Input Temperature Sensor*.
2. PWM sebagai *Signal Generator* untuk men-drive *Driver* agar dapat menghasilkan *Sequential Pulse*.



3. *Input Capture* digunakan untuk membaca *Hall Effect Sensor* yang digunakan. Sehingga diperoleh *Pulse Input Hall Effect Sensor* yang digunakan sebagai algoritma pada modular controller ini.
4. *Digital Input* digunakan untuk membaca direction dan brake switch signal.
5. *Digital Output* digunakan untuk mengontrol *Main Contactor* melalui relay 12 Volt.

c. *Digital Input*

Sebagian besar input pada aplikasi *Automotive* di Indonesia menggunakan level tegangan 12 volt sedangkan *Microcontroller* ini menggunakan level tegangan 3,3 Volt. Sehingga perlu rangkaian *Isolation Voltage* dengan menggunakan *Optocoupler*.

d. *Digital Output*

*Output Microcontroller* memiliki level tegangan 3.3 Volt sedangkan *Contactormaupun Relay* yang digunakan memiliki level tegangan 12 Volt. Sehingga diperlukan rangkaian yang dapat menaikkan level tegangan yaitu menggunakan Mosfet.

e. *Analog Input*

*Analog Input* yang digunakan meliputi *Throttle, Temperature Sensor, Current Sensor* dan *Regenerative Braking Reference*. Keseluruhan unit tersebut memiliki level tegangan dengan range 0-5 Volt sehingga diperlukan *Signal Conditioning*. Pengkondisian sinyal menggunakan *Voltage Divider* dengan *Capasitor* 100nF yang berfungsi sebagai penstabil tegangan.

f. *FTDI Serial Communication dan Bootloader*

*Modular Controller* ini dilengkapi dengan fitur *Programmable* sehingga pengguna dapat men-*Setting Parameter* sesuai dengan keperluan. Parameter yang dapat diatur misalnya *Current Value, RPM, Torque* dll. Agar dapat berkomunikasi dengan PC maupun Laptop maka diperlukan komunikasi serial data. *Modular Controller* ini menggunakan *FTDI Serial* sekaligus sebagai *Bootloader*.

---

### 3.1.4 Pembuatan *Hardware* dan *Firmware*

Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam pembuatan *Modular Controller 3 Phase Brushless DC Motor* ini adalah sebagai berikut :

1. Mensimulasikan rangkaian-rangkaian *Modular Controller* ini dengan menggunakan *Software Proteus*. Hal ini dilakukan untuk memastikan skematik yang akan digunakan dapat beroperasi sesuai prinsip kerja yang diinginkan.
2. Mendesain rangkaian *Modular Controller* dengan *Software Eagle*. Pada *Software* ini terdapat *Library-Library* sesuai dengan *Layout* komponen elektronik sehingga memudahkan kita dalam mendesain *Circuit PCB*.
3. Mendesain *FirmwareModular* dengan menggunakan bahasa C pada *Compiler Eclipsedengan Real Time Operating System Chibi OS*. *Chibi OS* memiliki *Library* yang dapat digunakan untuk membantu dalam membuat *Algoritma Modular Controller* ini. Agar lebih lengkap *Library Firmware*-nya dapat digabungkan dengan menggunakan *Standard Peripheral STM32*.
4. Mensimulasikan *Firmware Modular Controller* pada *Software Proteus* agar mengetahui *Firmware* tersebut sudah berjalan dengan baik atau masih terdapat *Error* .
5. Membuat rangkaian *HardwareModular Controller* tersebut dengan *Eagle*. Mengetsa desain rangkaian di PCB yang sudah digambar pada *Software Eagle* setelah itu memasang komponen elektronik di PCB.
6. Men-download *FirmwareModular Controller* yang telah didesain dari *Software ST-Link* ke rangkaian *HardwareModular Controller*.
7. Men-setting parameter agar motor sesuai dengan kondisi operasi.

### 3.1.5 Pengujian *Input dan Output*

Untuk mengurangi kerusakan yang terjadi pada motor DC yang dipakai maka perlu dilakukan pengujian *Input dan Output Modular Controller* ini.

Tabel 5 Cara Pengujian *Input&Output Modular Controller*

<i>Input / Output</i>	Cara Pengujian
<i>Power Supply</i>	<i>Output dan Input</i> tegangan pada <i>Regulator</i> diukur menggunakan Avometer.
<i>Minimum System Microcontroller</i>	Dilakukan pembacaan dan pemrograman dengan menggunakan <i>STM32 ST-Link</i>
<i>Direction Digital Input</i>	<i>Digital Input</i> diberi sinyal <i>High</i> (12 volt DC) dan <i>Low</i> (0-2 Volt DC) apakah terjadi perbedaan <i>Pulse</i> pada <i>Line Input Microcontroller</i> .
<i>Braking dan Throttle Analog Input</i>	Memberi <i>Power Supply</i> pada potentiometer dengan tegangan 5 Volt DC dan memutar potentiometer serta mengukur output tegangan apakah pada range 0 – 3,3 Volt DC.
<i>Precharge Contactor (Safety Contactor)</i>	Sinyal input untuk aktivasi <i>Controller</i> diberi tegangan 12 Volt apakah <i>Output Contactor</i> dapat mengeluarkan tegangan 12 Volt DC.
<i>Interface</i>	Komunikasi data dapat dicek melalui OBD2 maupun <i>CANDAPTER (CANDiagnostic Tools)</i> .
<i>Digital Input Hall Effect Sensor</i>	Diberi sinyal pulsa sesuai dengan <i>Logic</i> putaran motor.
<i>Output Sinyal level tegangan 12 Volt DC</i>	Ketiga sinyal output pada modular controller diukur dengan <i>Oscilloscope</i> dan dibandingkan. Sinyal yang diperoleh apakah sesuai dengan <i>Sequensial Logic</i> untuk <i>Algoritma BLDC Motor</i> .

Berikut metode untuk membandingkan performa *Modular Controller* ini dengan Controller Mitsuba :

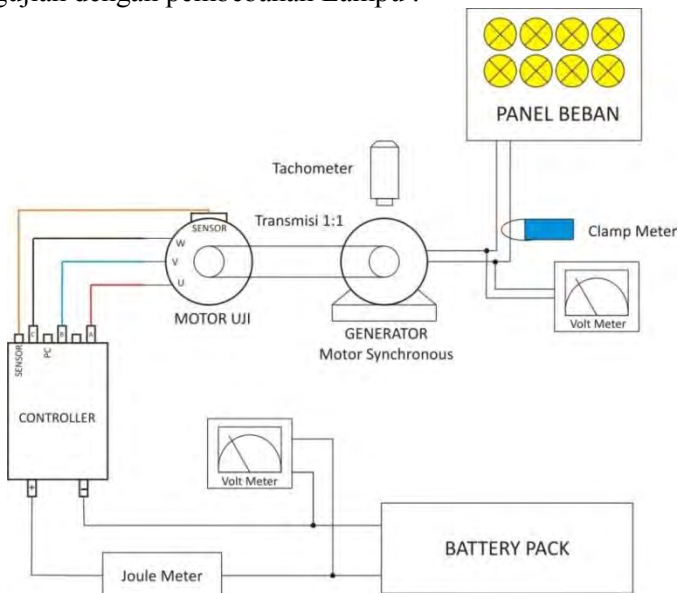
Tabel 6. Variabel Penelitian untuk Membandingkan Performa Controller

Variabel	Metode Pengukuran
Variabel Bebas (VB) : <i>Signal Conditioning</i> Variabel Terikat (VT) : Lebar pulsa. Variabel Terkontrol (VTR) : Sinyal Hall Effect Sensor, Level Tegangan Sinyal, Throttle pedal.	Sinyal diukur dengan menggunakan Pico Scope 6. Lebar pulsa diamati untuk memperoleh respon signal conditioning.
VT : <i>Timing</i> dan lebar sinyal <i>Switching Comutation</i> . VB : Microcontroller VTR : Sinyal Hall Effect Sensor, Level Tegangan Sinyal, Throttle pedal.	Sinyal diukur dengan menggunakan Pico Scope 6. Sinyal diamati untuk memperoleh logic comutation. Hubungan kondisi <i>Hall Effect Sensor</i> dengan timing maupun lebar pulsa <i>Comutation</i> .
VT : Arus Listrik, RPM VB : Beban divariasikan. Beban menggunakan generator untuk menyalakan lampu dengan power yang berbeda. VTR : Motor listrik yang digunakan, Throttle pedal,	Arus listrik diukur dengan menggunakan Joule meter. Joulemeter dimodifikasi sehingga dapat melakukan logger data menggunakan FTDI to USB. RPM diukur dengan menggunakan Tachometer.

### 3.1.6 Pengujian Menggunakan BLDC Motor

Setelah dilakukan pengujian input dan output pada modular controller ini dan logiknya benar maka siap dilakukan instalasi pada aplikasi *Brushless DC Motor*. Pengujian awal dilakukan dengan pembebanan generator listrik dengan beban

bola lampu. Setelah itu baru diuji di jalan. Berikut ini skema pengujian dengan pembebanan Lampu :



Gambar 3.2 : Skema Pengujian Motor Listrik dengan Pembebanan Lampu

Motor uji diputar dengan Throttle Position Sensor 100% untuk menggerakkan generator. Generator yang digunakan merupakan Motor Synchronous dengan putaran 1500 rpm. Transmisi yang digunakan pulley dan belt dengan rasio transmisi 1 : 1. Generator ditunggu sampai Synchron terlebih dahulu sehingga dapat menghasilkan tegangan lebih dari 220 Volt AC. Tegangan dan Arus Input diukur dengan menggunakan Volt meter dan Joule meter. Putaran motor diukur dengan menggunakan Tachometer. Setelah putaran motor stabil, mulai dilakukan pembebanan dengan menyalakan Lampu 100 Watt. Data yang diukur adalah tegangan input, arus input, putaran motor, arus output dan tegangan output. Pembebanan dilakukan sampai 1800 Watt dengan kenaikan 100Watt.

---

### 3.1.7 Analisa Data

Analisa yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis kuantitatif dengan membandingkan performa *Modular Controller* dengan *Controller* yang sudah ada di pasaran yaitu dengan *Mitsuba Controller M2096D2*. Analisis ini dapat digunakan sebagai acuan untuk men-*setting parameter* pada *Modular Controller* ini sehingga diperoleh respon yang sesuai. Berikut beberapa parameter untuk mengetahui performa *Controller* :

1. Sinyal dari output Signal Conditioning (Optocoupler).
2. Sequencial Logic pada *Controller*.
3. Waktu mencapai nilai set point.
4. Arus listrik pada saat pembebanan menggunakan generator dibandingkan dengan RPM yang dihasilkan.
5. Fitur untuk mempermudah pengoperasian *Controller*.

### 3.1.8 Validasi dan Verifikasi Desain

Validasi dan Verifikasi hasil penelitian ini dilakukan dengan langkah *Editing* maupun *Coding*. *Editing* adalah upaya untuk memeriksa kembali kebenaran data yang diperoleh serta melihat konsistensi dari setiap data yang diperoleh. Apabila ditemui data yang tidak konsiten maka perlu dilakukan pengumpulan data ulang maupun dapat dilakukan interpolasi data. *Coding* merupakan kegiatan pemberian kode alfabet pada variabel penelitian sehingga dapat memudahkan dalam menganalisa data. Evaluasi ini digunakan sebagai acuan untuk melakukan perbaikan desain *Modular Controller*.

Komponen pada desain skematik harus beroperasi sesuai dengan spesifikasinya. Hal ini dapat mengganggu sistem kerja *Modular Controller* tersebut, sehingga dapat menurunkan performa *Controller*. Komponen yang tidak sesuai dengan kondisi operasi dapat dideteksi secara fisik melalui :

1. Temperatur komponen tersebut meningkat

- 
2. *Life Cycle* komponen tersebut sangat singkat
  3. *Output* komponen tidak sesuai spesifikasi
  4. Unit tidak dapat beroperasi

### 3.1.9 Revisi Desain

Hasil evaluasi terhadap performa *Modular Controller* ini digunakan sebagai acuan untuk merevisi desain maupun skematik. Apabila rangkaian komponen elektronika tidak beroperasi sesuai dengan spesifikasinya maka perlu diganti dengan komponen yang sesuai dengan kebutuhan. Revisi juga dapat dilakukan dengan mendesain *Modular Controller* dengan komponen SMD sehingga bentuk fisik yang praktis dan memiliki dimensi kecil sehingga lebih minimalis.

### 3.1.10 Blueprint Modular Controller

Blueprint Modular Controller ini terdiri dari skematik, BOM dan BOQ diperoleh setelah proses pengujian dan revisi desain dilakukan. Material apa saja yang diperlukan dan berapa jumlahnya menjadi dasar dalam pembelian komponen. Selain itu *Blueprint Modular Controller* ini juga dapat dibuat untuk keperluan dokumentasi, sehingga apabila dilakukan penelitian dengan topik yang serupa dapat menjadi acuan. Penentuan material ataupun komponen memperhatikan beberapa parameter berikut :

- a. Fungsi dari komponen tersebut.
- b. Spesifikasi komponen yang akan dipakai, biasanya spesifikasi yang perlu diperhatikan adalah *PowerSupply* yang diperlukan, *Voltage Threshold*, *Delay Time*, *Temperature* kerja, *Level* tegangan *Input* dan *Output*.
- c. *Package* atau bentuk komponen, pengembangan rangkaian elektronika saat ini sudah mengarah terhadap pemakaian komponen SMD. Tugas akhir ini diharapkan mengoptimalkan penggunaan komponen SMD yang ada di pasaran sehingga desain dapat minimalis.

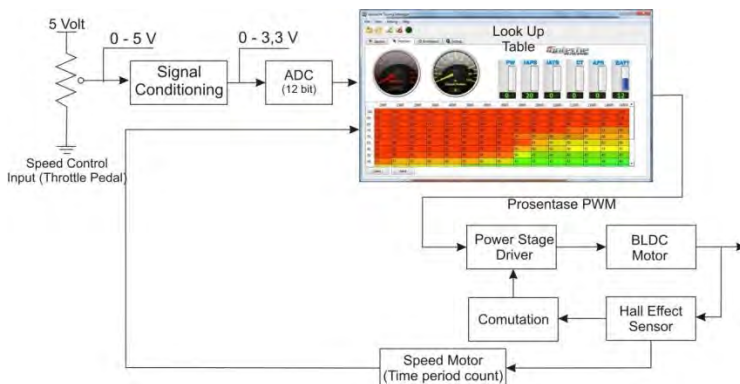
- d. Ketersediaan komponen di pasaran. Meminimalisir penggunaan komponen-komponen yang sulit diperoleh di local market Indonesia, namun apabila terpaksa berikut rujukan distributor dunia yang sangat lengkap menyediakan komponen elektronika : *Mouser, RS Component, Element 14, Digikey, Global Sources*.

### 3.1.11 Penyimpulan Hasil Penelitian

Bagian akhir adalah menyimpulkan hasil penelitian. Penelitian ini memiliki target untuk menghasilkan *Modular Controller* yang dapat digunakan untuk mengontrol *3 Phase Brushless DC Motor*. Pada tahap ini juga ditentukan bagian mana yang dapat dipatenkan dari hasil penelitian *Modular Controller* ini. Saran dan rekomendasi juga diperlukan agar *Research and Development (R&D) Modular Controller* ini dapat berlanjut.

### 3.2 Diagram System Modular Controller

*Modular Controller* ini menggunakan *Proportional* dan *Integral Controller* untuk memperkecil kesalahan pada sistem. Berikut *Closed Loop System Modular Controller* ini :



Gambar 3.3 Block Diagram Modular Controller



---

Throttle pedal merupakan komponen yang digunakan untuk menghasilkan kecepatan referensi. Output *Throttle Pedal* memiliki standard dengan range tegangan 0-5 Volt DC. Saat ini Throttle pedal menggunakan dua metode yang hall effect dan variabel resistor. *Hall Effect Pedal* lebih rentan terhadap gangguan medan magnet di sekitar rangkaian. *Throttle Pedal* dengan metode variabel resistor merupakan solusi permasalahan ini, sehingga sebagian besar produsen motor controller menggunakan pedal tipe ini.

Sinyal Output *Throttle Pedal* perlu dikondisikan agar sesuai dengan tegangan operasi pada *Micro Controller*. Sinyal tersebut dikondisikan dengan *Voltage Divider* yang memiliki gain 0,66 dan distabilkan menggunakan *Capasitor* 100 nF.

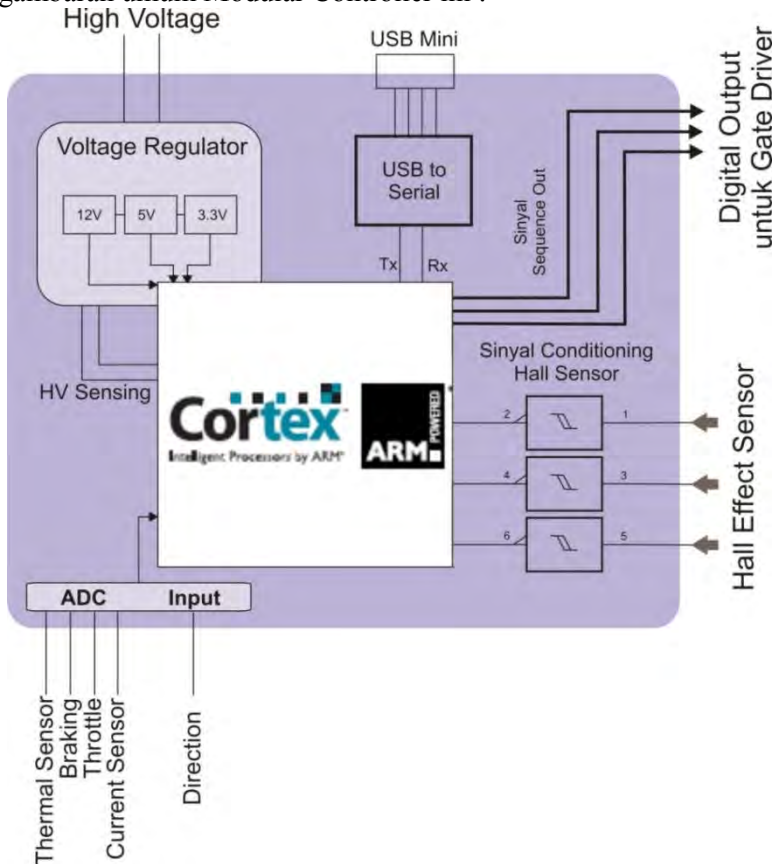
Data Putaran Motor Listrik dan ADC Throttle Pedal digunakan untuk menentukan Look Up Table, sehingga diperoleh nilai Prosentase PWM yang akan diberikan pada *Power Stage Driver*. Apabila nilai ADC dan RPM berada diantara nilai yang tersedia maka dilakukan interpolasi.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Blueprint Modular Controller

Modular Controller ini terdiri dari beberapa Input/Output (I/O), USB to Serial dan Power Supply. Berikut ini merupakan gambaran umum Modular Controller ini :



Gambar 4.1 Arcitecture Modular Controller

#### 4.1.1 Komponen Penyusun Modular Controller

Berikut ini merupakan penjelasan masing-masing komponen penyusun Modular Controller ini :

##### a. Minimum System STM32F3

Modular Controller ini menggunakan Micro Controller STM32F303 dengan konfigurasi pin I/O sebagai berikut :

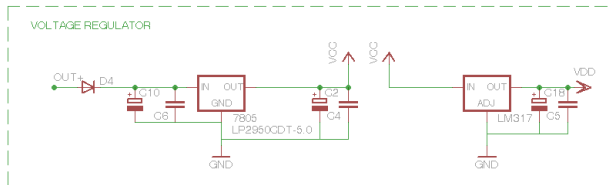
Tabel 7 : STM32F303 Pin I/O Modular Controller

Port	Pin Number	Function	Description
<b>PORT A</b>			
PA0	14	ADC_TPS	Analog Input Throttle Pedal
PA1	15	ADC_Current	Analog Input untuk sensor Arus
PA2	16	ADC_Temperature	Analog Input untuk sensor Temperature
PA3	17	ADC_Voltage	Analog Input pembaca tegangan
PA9	42	TX	Transmitter Serial to USB
PA10	43	RX	Receiver Serial to USB
PA11	44	DM	Pin untuk download Program
PA12	45	DP	Pin untuk download Program
PA13	46	SWDIO	Pin untuk download Program
PA14	47	SWDCLK	Pin untuk download Program
<b>PORT B</b>			
PB0	26	In_U	Digital Input Hall effect 1 (Interrupt Mode)

PB1	27	In_V	Digital Input Hall effect 2
PB2	28	In_W	Digital Input Hall effect 3
PB4	56	Mode Power	Digital Input Mode Power
PB5	57	Mode Eco	Digital Input Mode Eco
PB7	59	Main	Digital Input main safety Switch
PB8	61	Forward	Digital Input Forward
PB9	62	Brake	Digital Input Brake Switch
PORT C			
PC4	24	LED	Indicator Sistem
PC6	37	L_in 3	Digital Output Low_In 3
PC7	38	L_in 2	Digital Output Low_In 2
PC8	39	L_in 1	Digital Output Low_In 1
PC9	40	H_in 3	Digital Output High_In 3
PC10	51	H_in 2	Digital Output High_In 2
PC11	52	H_in 1	Digital Output High_In 1



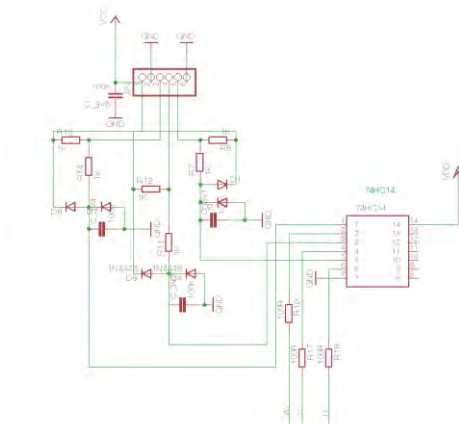
Volt menjadi 3.3 Volt DC. Sedangkan untuk menurunkan tegangan dari 12 Volt menjadi 5 Volt DC menggunakan 7805. Masing-masing input dan output regulator dilengkapi dengan kapasitor untuk penstabil tegangan. Berikut rangkaian power regulator :



Gambar 4.3 Skematik Regulator 5 dan 3.3 Volt DC

### c. Signal Conditioning Digital Input

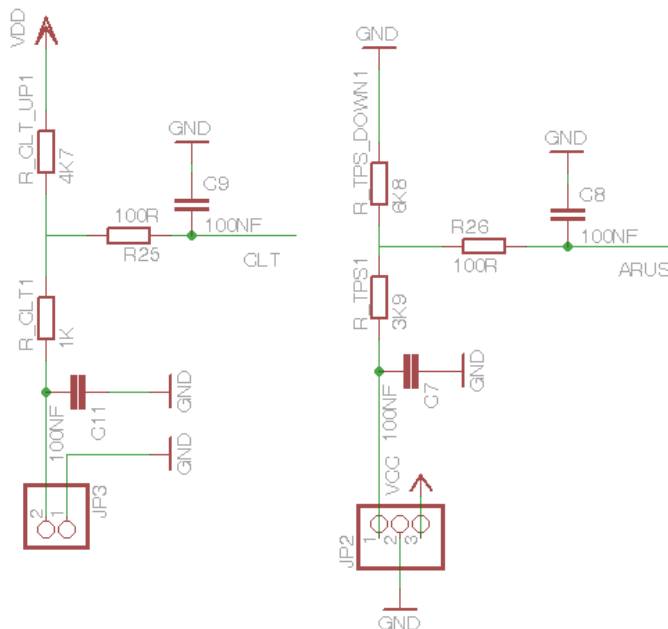
Sinyal dari Hall Effect Sensor perlu dikondisikan untuk memenuhi level tegangan operasi STM32F303. Modular controller ini menggunakan 74HC14 untuk mengkondisikan sinyal output dari Hall Effect Sensor. 74HC14 merupakan IC logic dengan 6 trigger input. IC ini dapat mengubah sinyal input logic yang lemah menjadi lebih tajam. 74HC14 memiliki high speed Si-gate CMOS dengan Low-power Schottky sehingga cocok digunakan sebagai pengkondisi sinyal Hall Effect.



Gambar 4.4 Skematik Signal Conditioning Hall Effect

#### d. Analog Input

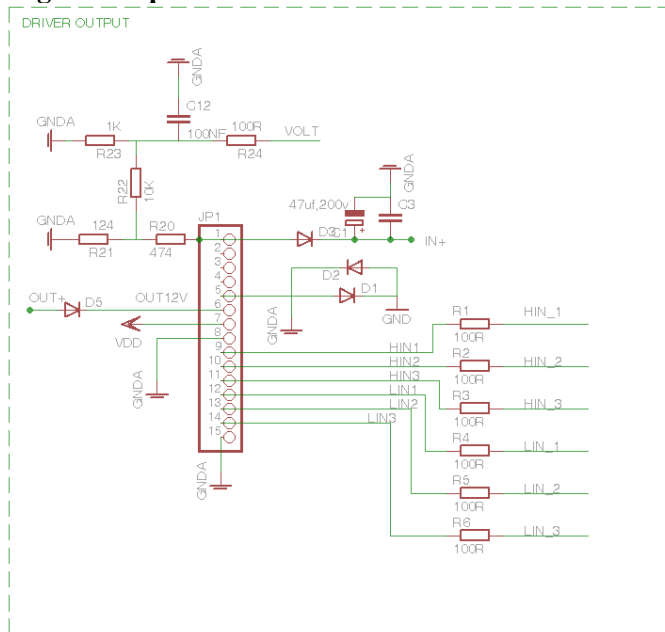
Iquteche Modular Controller ini memiliki analog input berupa Throttle Position Sensor (TPS), Current Sensor, dan Temperature Sensor. Level tegangan sensor-sensor tersebut memiliki standard 5 Volt, sedangkan Micro Controller STM32F303 ini memiliki level tegangan 3.3 Volt sehingga perlu diberi rangkaian signal conditioning. Rangkaian tersebut menggunakan Voltage Divider dengan Output dilengkapi Capacitor 100 nF untuk menstabilkan Analog Input. Pin out Throttle Modular Controller ini disamakan dengan standard Dunia yaitu +5V, GND dan Sinyal. Sehingga Modular Controller ini dapat digunakan pada berbagai hardware Motor Listrik (berbagai Merk).



Gambar 4.5 Skematik Devider Analog Input



### e. Digital Output



Gambar 4.6 Driver Output Modular Controller

Driver Brushless DC Motor dapat menggunakan Mosfet maupun IGBT. Rangkaian menggunakan *Half Bridge*, untuk mengontrol driver ini diperlukan 6 pin Output modular Controller yaitu Low\_in 1, 2 dan 3 serta High\_in 1, 2 dan 3. Masing-masing pin out tersebut dicontroll menggunakan sinyal PWM. Untuk melindungi pin Micro Controller rangkaian di seri dengan Resistor 100R.

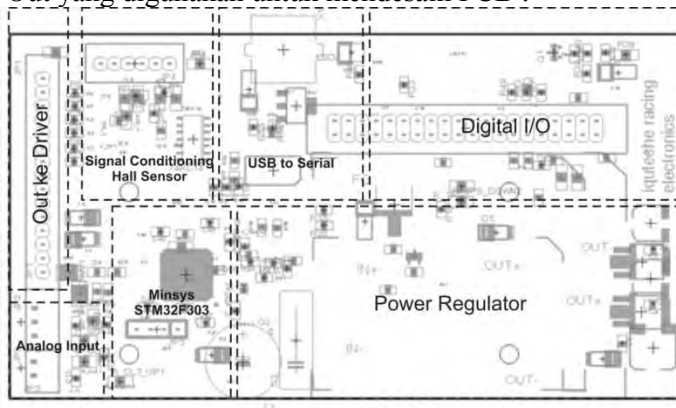
## f. USB to Serial

Untuk mendownload program dan berkomunikasi dengan komputer. Modular controller ini dapat diprogram sesuai dengan kondisi yang diinginkan pengguna. USB serian menggunakan IC FTDI FT232RL. Untuk menurunkan level tegangan 5 Volt pada USB digunakan voltage regulator LD1117. Berikut skematik USB to Serial Modular Controller ini :

#### 4.1.2 Desain Board Modular Controller

### a. Printed Circuit Board (PCB) Modular Controller

Komponen menggunakan SMD package agar dimensi PCB lebih kecil. Agar memudahkan dalam memperbaiki Modular Controller apabila terjadi kerusakan maka desain PCB perlu dikelompokkan berdasarkan Sub module. Berikut ini merupakan Lay Out yang digunakan untuk mendesain PCB :

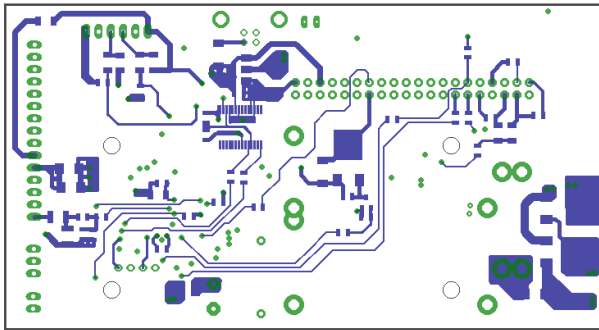


Gambar 4.8 Lay Out PCB Modular Controller

Board Modular Controller ini menggunakan *PCB4* layer agar diperoleh dimensi board yang kecil dan dapat memisahkan sinyal micro Controller dengan jalur Power Supply. Berikut desain masing-masing layer PCB :

1. Layer 1

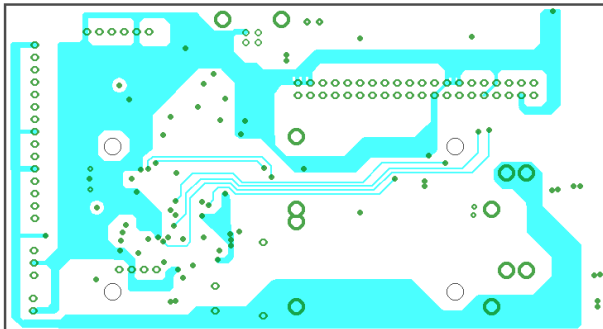
Layer 1 merupakan lapisan PCB paling bawah yang didesain sebagai jalur sinyal untuk komponen-komponen yang memiliki package DIP serta komponen pendukungnya. Berikut desain PCB layer 1 Modular Controller ini :



Gambar 4.9 PCB Layer 1 (Bawah) Modular Controller

2. Layer 2

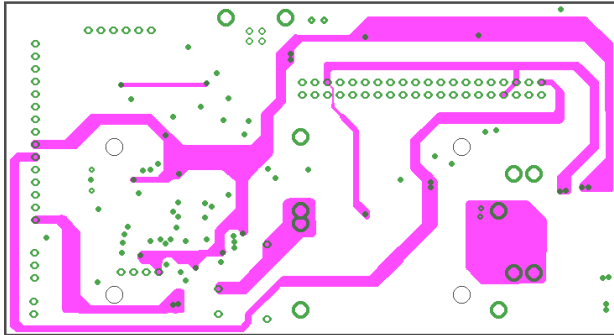
Layer 2 didesain sebagai jalur Ground (GND). Jalur GND perlu didesain lebih lebar untuk memfilter gangguan sinyal. Berikut desain layer 2 :



Gambar 4.10 PCB Layer 2 Modular Controller

### 3. Layer 3

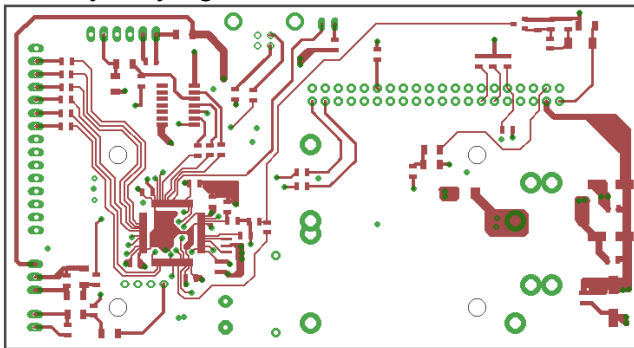
Layer 3 didesain sebagai jalur positif Supply. Jalur positif Supply terdiri dari positif High Voltage, positif 12 Volt, positif 5 Volt dan positif 3 Volt. Berikut desain layer 3 :



Gambar 4.11 PCB Layer 3 Modular Controller

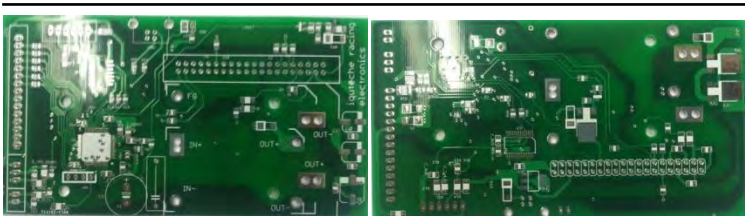
### 4. Layer 4

Layer 4 merupakan layer utama, sebagian besar komponen menumpu pada layer ini. Micro Controller juga berada di layer ini, berikut layer 4 yang telah didesain :



Gambar 4.12 PCB Layer 4 (Atas) Modular Controller

Board yang telah didesain kemudian dilakukan manufacturing. Karena PCB yang didesain memiliki 4 layer maka pemesanan PCB dapat dilakukan di China. Berikut hasil pembuatan Board Modular Controller Iquteche ini :



a. PCB Tampak Atas                      b. PCB Tampak Bawah

Gambar 4.13 PCB Modular Controller Iquteche

**b. Bill of Material dan Bill of Quantity**

Untuk membuat satu unit Modular Controller ini diperlukan komponen-komponen berikut ini :

Tabel 8: Bill of Material dan Bill of Quantity Modular Controller

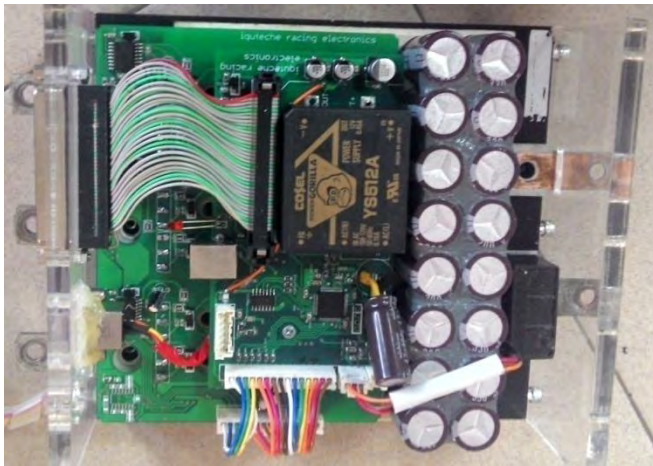
No	Komponen	Spesifikasi	Package	Jmlh
1	STM32F303	ARM Cortex-M4 MCU with 256 Kbytes Flash, 72 MHz CPU, MPU, CCM, 12-bit ADC 5 MSPS, PGA, comparators	LQFP48	1
2	74HC14	Hex inverting Schmitt trigger	SO14	1
3	FTDI	FT232RL	28 Pin SSOP 28	
4	Capacitor	ELCO 47UF, 200V	D 5MM	1
5		1UF, 200v	GRID 10 MM	1
6		ELCO 33uf,16v	D 5MM	1
7		ELCO 100UF,16V	D 5MM	1
8		100nF, 16v	CASE 0805	6
9		10nF, 16v	CASE 0603	18
10		100nF, 16v	CASE 0603	3

11	Resistor	Resistor 22R, 5%	1210	24
12		Resistor 1K, 5%	CASE 0805	1
13		Resistor 221, 5%	CASE 0805	6
14		Resistor 105, 5%	CASE 0603	18
15	Diode		M7	5
16	LED	LED Red	Grid 3 mm	1
17	7805	Regulator 5 Volt	DPAK	1
18	L1117	Regulator 3.3 Volt	DPAK	1
19	Mosfet	RFR3806	DPAK	1
20		LD33A	SOT223	1
21	USB	Mini USB	-	1
22	Transistor	NPN General Purpose	SOT23	1
23		PNP General Purpose	SOT23	1

#### 4.1.3 Pembuatan Modular Controller

Proses pembuatan Modular Controller ini sebagai berikut :

1. Identifikasi sensor-sensor dan actuator yang digunakan untuk mengontrol 3 Phase Brushless DC Motor.
2. Study referensi *Datasheet* komponen yang dapat digunakan.
3. Pembuatan *Library* komponen yang digunakan pada Software Eagle.
4. Test komponen yang digunakan dengan referensi manual operation pada datasheet. Test komponen menggunakan PCB modul yang terpisah dengan rangkaian lainnya sehingga dapat di ganti dengan rangkaian laian apabila tidak sesuai dengan pulse yang dihasilkan.
5. Pembuatan PCB rangkain yang telah dites.
6. Pemesanan PCB dan komponen yang diperlukan.
7. Assembly dan test rangkaian.
8. Memprogram Modular Controller

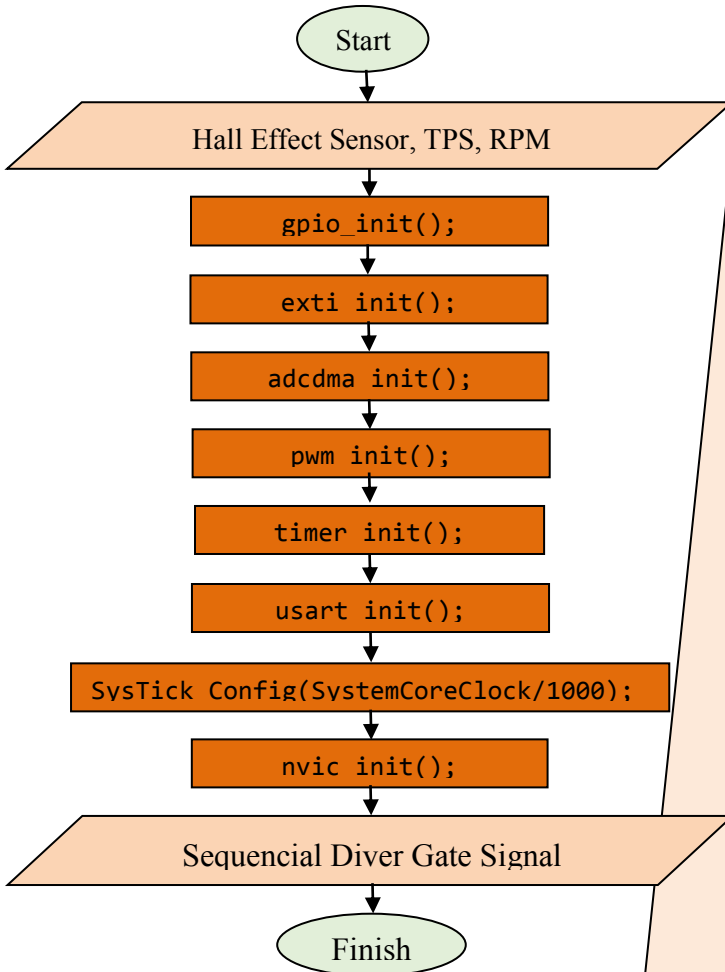


Gambar 4.14 Hasil Assembly Modular Controller Iquteche

#### 4.1.4 Firmware Modular Controller

##### a. Flowchart Program

Berikut merupakan flowchart program Modular Controller ini :



Gambar4.15Flowchart Program Modular Contro



---

Berikut penjelasan secara global masing-masing step program :

**a. gpio\_init();**

Step ini merupakan step awal untuk mengaktifkan pin I/O yang digunakan pada STM32F303. Format penulisan bahasa C yang digunakan adalah sebagai berikut:

**# Untuk mengaktifkan PB 8 dan PB 9 sebagai input :**

(PB 8 digunakan sebagai input direction (Forward/Reverse)

sedangkan PB9 merupakan pin input Brake)

```
GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
```

```
RCC_AHBPeriphClockCmd(RCC_AHBPeriph_GPIOB,  
    ENABLE);
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_8 | GPIO_Pin_9;
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
```

```
GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);
```

**# Untuk mengaktifkan PC4, PC6, PC7, PC8, PC 9, PC10 dan PC11 sebagai output (penjelasan pin dapat dilihat pada tabel 8) :**

```
RCC_AHBPeriphClockCmd(RCC_AHBPeriph_GPIOC,  
    ENABLE);
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_4 | GPIO_Pin_6 |  
    GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8 | GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10 |  
    GPIO_Pin_11;
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT;
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
```

```
GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
```

Untuk membuat PC8 tersebut high adalah sebagai berikut :

```
GPIOC->BSRR = GPIO_Pin_8;
```

Untuk membuat PC8 tersebut low adalah sebagai berikut :

```
GPIOC->BRR = GPIO_Pin_8;
```

### **b. exti\_init();**

Untuk membaca perubahan Hall Effect Sensor menggunakan External Interrupt. Ekternal Interrupt berfungsi mengaktifkan fungsi ketika ada perubahan sensor, dimana fungsi tersebut tidak mempengaruhi looping pada main function sehingga tidak menimbulkan delay. Modular Controller ini menggunakan 4 External Interrupt yaitu :

#### **1. EXTI0\_IRQHandler**

EXTI pin Source 0 yaitu pada PB0 digunakan sebagai digital input Hall Effect Sensor 1. Fungsi ini berjalan ketika ada perubahan sinyal pada PB0, perubahan yang dapat diketahui adalah saat terjadi Rising (Sesaat ketika mejadi high level) dan Falling (Sesaat ketika menjasi low level). External Interrupt ini mengaktifkan fungsi hall signal(); sehingga PB0 dapat dibaca perubahannya. Inisialisasi dapat dilihat pada lampiran program. Untuk membaca pin Source B0 dapat menggunakan perintah sebagai berikut :

```
GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_0);
```

#### **2. EXTI1\_IRQHandler**

EXTI pin Source 1 yaitu pada PB1 digunakan sebagai digital input Hall Effect Sensor 2. Fungsi ini berjalan ketika ada perubahan sinyal pada PB1, perubahan yang dapat diketahui adalah saat terjadi Rising (Sesaat ketika mejadi high level) dan Falling (Sesaat ketika menjasi low level). External Interrupt ini mengaktifkan fungsi hall signal(); sehingga PB1 dapat dibaca perubahannya. Inisialisasi dapat dilihat pada lampiran program. Untuk membaca pin Source B0 dapat menggunakan perintah sebagai berikut :

```
GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_1);
```

#### **3. EXTI2\_TS\_IRQHandler**

EXTI pin Source 2 yaitu pada PB2 digunakan sebagai digital input Hall Effect Sensor 3. Fungsi ini berjalan ketika ada perubahan sinyal pada PB2, perubahan yang dapat diketahui

adalah saat terjadi Rising (Sesaat ketika mejadi high level) dan Falling (Sesaat ketika menjasi low level). External Interrupt ini mengaktifkan fungsi hall signal(); sehingga PB0 dapat dibaca perubahannya. Inisialisasi dapat dilihat pada lampiran program. Untuk membaca pin Source B0 dapat menggunakan perintah sebagai berikut :

```
GPIO_ReadInputDataBit(GPIOB, GPIO_Pin_2);
```

#### 4. EXTI9\_5\_IRQHandler

EXTI pin Source 5 yaitu pada PA8 digunakan memastikan gate driver IGBT maupun Mosfet tidak aktif keduanya. Fungsi ini berjalan ketika ada perubahan sinyal pada PA8, perubahan yang dapat diketahui adalah saat terjadi Rising (Sesaat ketika mejadi high level) dan Falling (Sesaat ketika menjasi low level). External Interrupt ini menggunakan perintah sebagai berikut :

```
if(GPIO_ReadInputDataBit(GPIOA, GPIO_Pin_8))
{
    if(phaseAL==1) phaseAL_on;
    else phaseAL_off;
    if(phaseBL==1) phaseBL_on;
    else phaseBL_off;
    if(phaseCL==1) phaseCL_on;
    else phaseCL_off;
}
else
{
    phaseAL_off;
    phaseBL_off;
    phaseCL_off;
}
```

#### c. adcdma\_init();

Analog to Digital Direct Memory Access (ADC DMA) digunakan untuk membaca analog input dan dirubah menjadi data digital. ADC STM32F303 memiliki resolusi 12 bit. ADC yang digunakan sebagai berikut :

---

```

adc_tps = adcrate[0];// membaca analog input TPS pada PA0
adc_amp = adcrate[1];// membaca analog input current pada PA1
adc_clt = adcrate[2];// analog inputTemperature pada PA2
adc_volt = adcrate[3];// membaca analog input Voltage pada PA3

```

Throttle Position Sensor (TPS) digunakan untuk mengatur width pada Pulse Width Modulation (PWM) sehingga dapat mengatur besarnya arus pada beban motor. TPS ini memiliki nilai 0-100% yang sebanding dengan bukaan Throttle. Berikut kalkulasi TPS yang dimaksud :

```

adc_calc = (float)(adc_tps - 626)/((3368 - 626)/100);
if(adc_calc<0) adc_calc=0;
elseif(adc_calc>100) adc_calc=100;
tps = adc_calc;

```

#### d. `pwm_init();`

Pulse Width Moduation (PWM) digunakan untuk mengatur Arus yang dialirkan ke beban yang linier terhadap Putaran motor dan TPS. PWM ini menggunakan Timer 1 yang digunakan untuk mengaktifkan PA8.PA8 dapat mengaktifkan External Interrupt pin Source 5. Nilai PWM Proportional terhadap nilai TPS, sebagai berikut :

```

int pwm = 100-tps;
if (tps==100) pwm=1;
if(pwm>91) pwm=91; // digunakan untuk membatasi pwm
sampai maksimal 91
TIM1->CCR1 = pwm*pwmperiode/100; // mengatur pwmperiode
sesuai nilai PWM

```

#### e. `timer_init();`

Fungsi `timer_init();` ini adalah untuk inisialisasi Timer2 sebagai penghitung waktu. Nilai Timer2 sebanding dengan nilai rpm pada motor. Berikut formula rpm yang dimaksud :

```

tim2val = TIM2->CNT ;
freq = SystemCoreClock / 71 / tim2val;
rpm = freq*60/6;

```

---

---

```
TIM2->CNT = 0;
tim2ovl=0;
```

**f. usart\_init();**

USART digunakan untuk komunikasi serial dengan komputer. Modular Controller ini menggunakan USART 2 yaitu pada PA9 dan PA10. USART 2 juga dapat digunakan sebagai downloader untuk memasukkan program pada micro Controller. Berikut data-data yang ditampilkan pada modular controller ini :

```
printf ("%d",rpm);
printf ("%d",tps);
printf ("%d",amp);
printf ("%d",volt);
printf ("%d",clt);
printf ("%d",tpsbrake);
printf ("%d",adc_tps);
printf ("amp:%d",adc_amp);
printf ("volt:%d",adc_volt);
printf ("clt:%d",adc_clt);
printf ("%d%d%d",u,v,w);
printf ("rot=%d",rot);
printf ("brake=%d",brake);
```

**g. SysTick\_Config(SystemCoreClock/1000);**

Fungsi ini digunakan untuk mengatur sistem frekuensi Micro Controller.

**h. nvic\_init();**

NVIC digunakan untuk men-setting prioritas fungsi mana yang didahulukan. Prioritas utama Modular Controller ini merupakan External Interrupt untuk Hall Effect Sensor. Prioritas yang digunakan 0 dan 1. Prioritas selanjutnya adalah untuk timer PWM yaitu prioritas 3. Prioritas 4 digunakan untuk menghitung putaran Motor dengan menggunakan interrupt timer2. Prioritas ke

6 digunakan untuk komunikasi data. Berikut inisialisasi nvic yang dimaksud :

```

NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStructure;
NVIC_PriorityGroupConfig(NVIC_PriorityGroup_4);

NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = EXTI0_IRQn;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = EXTI1_IRQn;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 1;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = EXTI2_TS_IRQn;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 1;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = EXTI9_5_IRQn
; //pwm
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 3;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);

NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = TIM2_IRQn; //ign
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 4;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;

```

---

```
NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);
```

```
NVIC_SetPriority(SysTick_IRQn, 5);
```

```
//usart
```

```
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = USART1_IRQn;
```

```
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 6;
```

```
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
```

```
NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
```

```
NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);
```

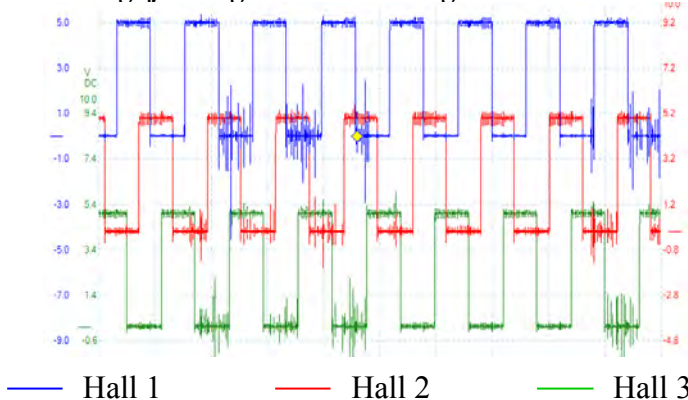
## 4.2 Data Hasil Pengujian dan Pembahasan

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan membandingkan performa Iquteche Controller dengan Mitsuba Controller. Berikut ini data hasil pengujian dengan beberapa metode :

### 4.2.1 Pengujian Input dan Output Modular Controller

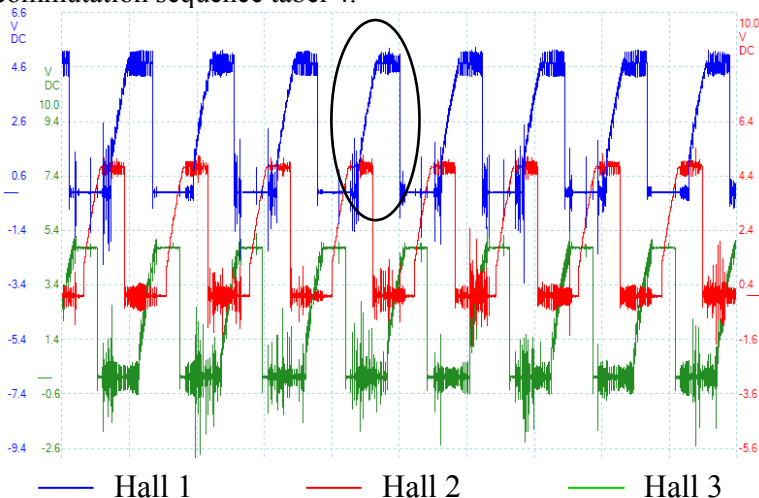
Pengujian Input dan Output merupakan step awal untuk memastikan algoritma tidak bermasalah. Hasil pengukuran dibandingkan, dan dievaluasi untuk memperoleh skematik yang sesuai.

#### 4.2.1.1 Pengujian Signal Conditioning Hall Effect Sensor



Gambar 4.16 Pengkondisian Hall Effect Sensor Mitsuba Controller

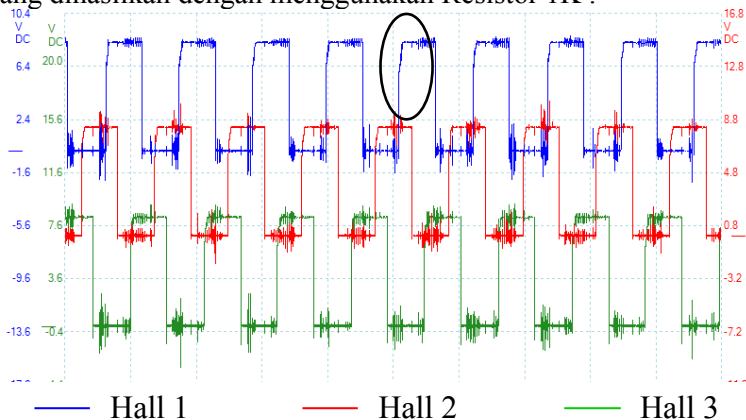
Pulse yang dihasilkan Hall Effect Sensor pada Mitsuba Controller memiliki ketajaman sinyal saat Rising maupun Falling. Semakin tajam proses Rising maupun Falling maka pembacaan semakin mendekati sinyal yang dikeluarkan sensor. Sehingga delay yang dihasilkan semakin kecil. Sinyal pada gambar 4.16 menunjukkan terdapat gangguan pada level high maupun level low. Gangguan tersebut tidak dapat berpengaruh pada sistem karena sinyal ini selanjutnya akan dikondisikan dengan 74HC14. Sinyal 74HC14 memiliki high level voltage minimal 3.98 Volt dan Low level output voltage sebesar maksimal 0.1 Volt. Sehingga noise yang tidak mencapai tegangan tersebut tidak berpengaruh. Berdasarkan gambar sinyal Hall Effect Sensor di atas dapat diperoleh comutation sebagai berikut : 001, 101, 100,110,010, dan 011 untuk forward serta 100,101,001,011,010 dan 110 untuk arah reverse. Kondisi ini sesuai dengan commutation sequence tabel 4.



Gambar 4.17Pengkondisian Hall Effect Sensor pada Iquteche ControllerVersi 1

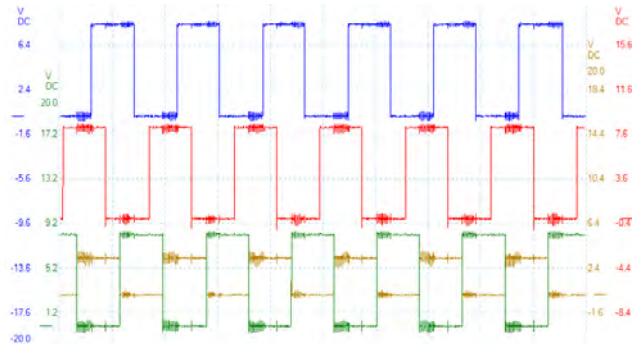


Sinyal pada gambar 4.17 masih terlalu banyak gangguan yang dapat mempengaruhi algoritma program. Rising pada sinyal ini landai sehingga terdapat jeda antara sesaat setelah terjadi rising dengan saat menjadi high level. Hal ini yang menimbulkan ketidakpastian kondisi sebenarnya dengan Output sinyal gate pada Mosfet. Sinyal yang melandai dapat disebabkan oleh besarnya Resistor *Pull Up* yang tidak sesuai. Pada kondisi ini, Resistor yang digunakan sebesar 10K. Selanjutnya dipilih resistor yang paling baik respon saat terjadi *Rising*-nya. Berikut sinyal yang dihasilkan dengan menggunakan Resistor 1K :



Gambar 4.18 Pengkondisian Hall Effect Sensor pada Iquteche Controller Versi 2

Sinyal 4.18 sudah lebih baik daripada versi 1, tetapi masih terdapat sinyal yang landai (pada lingkaran hitam). Sinyal ini dapat dihilangkan dengan *Bypass Diode*, diode dipasang searah dengan supply 5 Volt dan berlawanan dengan GND. Berikut sinyal yang dihasilkan setelah pemasangan diode :



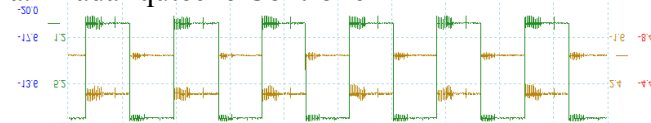
Gambar 4.19 Pengkondisian Hall Effect Sensor pada Iquteche Controller Versi 3

Sinyal pada gambar 4.19 dan gambar 4.17 memiliki ketajaman yang sama baik saat *Rising* maupun saat *Falling*. Hal ini menunjukkan respon rangkaian Signal Conditioning Mitsuba Controller dan Iquteche sama.

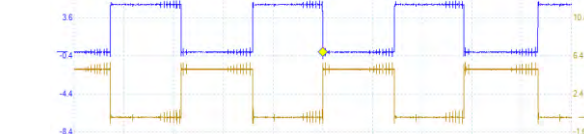
#### 4.2.1.2 Perbandingan Output Hall Effect Sensor dengan Output Signal Conditioning

Perbandingan output Hall Effect Sensor dengan output Signal Conditioning digunakan untuk mengetahui apakah 74HC14 bekerja secara normal. Berikut hasil pengukuran sinyal dengan menggunakan Picoscope :

##### a. Pada Iquteche Controller



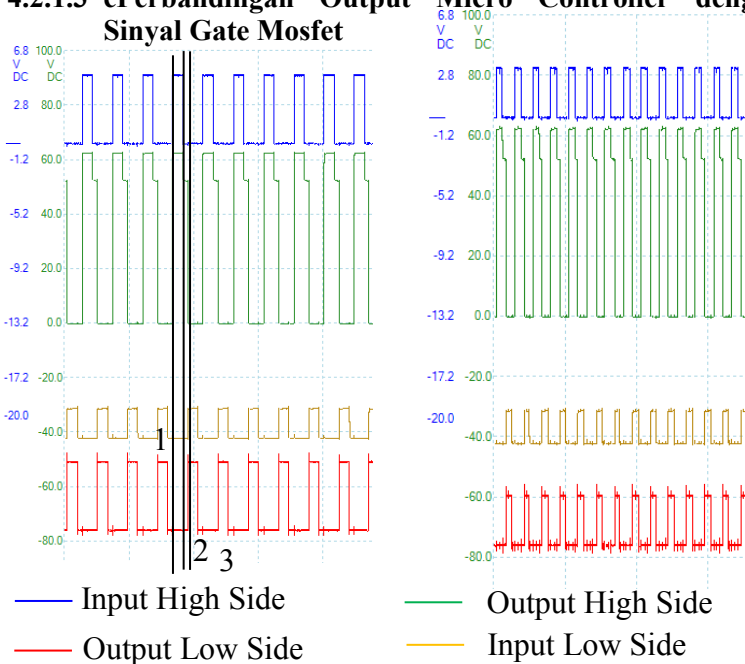
##### b. Pada Mitsuba Controller



Gambar 4.20 Sinyal Output 74HC14 pada Mitsuba Controller dan Iquteche Controller

Sinyal di atas menunjukkan bahwa respon Output memiliki delay yang sangat kecil sehingga terlihat sama saat terjadi *Rising* dan *Falling*. Hal ini diperlukan Controller, agar sinyal yang dihasilkan Controller selaras dengan *Output Hall Effect Sensor*. Untuk memperoleh Controller yang baik tentunya Input yang dimasukkan ke Controller harus sesuai dengan putaran motor yang akan dikontrol. Apabila terjadi delay akibat pembacaan pada sensor maka Comutation pada Motor akan mengalami kesalahan. Akibatnya putaran Motor tidak akan mulus dan dapat menurunkan performa Motor Listrik.

#### 4.2.1.3 cPerbandingan Output Micro Controller dengan Sinyal Gate Mosfet



a. Mitsuba Controller

b. Iquteche Controller

Gambar 4.21 Perbandingan Output Micro Controller dengan Sinyal pada Gate Mosfet

Sinyal yang dihasilkan Iquteche controller dan Mitsuba controller pada dasarnya memiliki konsistensi bentuk sinyal yang sama. Mitsuba Controller lebih halus saat high maupun low, noise yang dihasilkan sedikit. Sedangkan pada Controller Iquteche noise yang terjadi lebih banyak, meskipun demikian noise tersebut tidak berpengaruh pada mosfet karena perubahannya tidak mencukupi untuk mengaktifkan ataupun mematikan Mosfet dan IGBT. Noise tersebut disebabkan oleh pengaruh medan magnet pada rotor yang tidak merata, power supply yang tidak stabil, impedansi akibat jalur tegangan tinggi, dll. Garis 1 menunjukkan sinyal input high saat terjadi Rising. Saat yang bersamaan Output IRS2110 juga mengalami Rising dengan response sangat cepat yaitu dengan kemampuan delay time sebesar 25 ns. Sehingga terlihat sinyal pada Picoscope bersamaan. Pada garis 1 sampai 2 Output IGBT ataupun Mosfet akan mengaktifkan High Side sehingga akan menyambungkan baterai Positif. Tepat pada garis 2 Input high mengalami falling sehingga saat bersamaan Output IRS2110 juga terjadi falling sebesar 12 Volt (sesuai supply IC IRS2110). Setelah terjadi Falling sebesar 12 volt, sinyal mengalami fase Matching (jeda antara high side dengan Low side). Matching merupakan fitur pengaman dari IC IRS2110 sehingga menghindari bertemunya high side dan low side. Delay Matching IC ini selama maksimal 10 nS. IC IRS2110 ini tidak dilengkapi dengan Fault Detector sehingga apabila Input high side dan Low side diberi sinyal high akan mengaktifkan Mosfet/IGBT high side dan low side sekaligus. Apabila hal ini terjadi maka Baterai + akan kontak dengan Baterai negatif sehingga terjadi Short circuit. Setelah melalui fase Matching selama maksimal 10nS maka sinyal Low input aktif sehingga saat itu kutub menjadi negatif dan membuang sisa tegangan dengan mendischarge resistor. Ketajaman proses Falling pada high side dipengaruhi oleh Resistor pull down dari Gate ke Drain Mosfet. Semakin kecil resistor yang dipakai maka akan semakin cepat

proses Fallingnya (semakin tajam) tetapi perlu diperhatikan bahwa semakin kecil nilai Resistor yang dipasang maka arus yang melalui resistor tersebut semakin besar. Sehingga harus diantisipasi dengan pemilihan Resistor dengan Watt yang besar untuk mengkompensasi panas yang diterima Resistor. Resistor yang dipakai adalah SMD 1210 package dengan resistansi 22 Ohm 1/16W-2W.

## 4.2.2 Data Unjuk Kerja Modular Controller

Setelah dilakukan pengujian input/output dan memastikan algoritma sudah benar, dapat dilakukan pengujian unjuk kerja Motor Controller.

### 4.2.2.1 Uji TanpaPembebanan

Pengujian ini menggunakan variabel terkontrol sebagai berikut :

Motor : ACG 500 Watt

Type Baterai : LiFePO4 60 AH dengan Tegangan Open Cell  
52,65 Volt DC

Wiring yang digunakan sama termasuk Driver Mosfet yang digunakan.

Berikut data hasil pengujian yang telah dilakukan :

Tabel 9 : Hasil Pengujian TanpaPembebanan

No	Parameter	Top Speed Mitsuba Mode Power	Top Speed Iquteche
1.	Putaran motor	4536 rpm	8238 rpm
2.	Arus Listrik	1,070 A	3,460 A
3.	Tegangan Supply	52,1 Volt DC	51,9 Volt DC

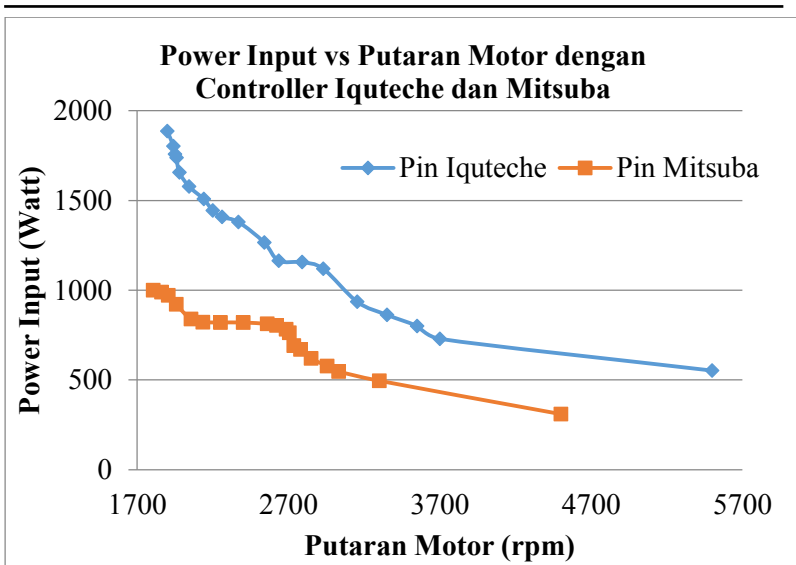
Berdasarkan tabel 9 menunjukkan bahwa putaran motor dengan menggunakan Iquteche Controller lebih cepat dibandingkan Mitsuba Controller mode Power. Sedangkan efisiensi Motor akan dibahas pada pengujian berikutnya. Berikut beberapa alasan yang dapat mempengaruhi top speed motor dari sisi Controller :

1. Algoritma program (mempengaruhi kecepatan memproses data)
2. Limiter (beberapa Controller sengaja dilengkapi limiter sebagai pengaman)
3. Fitur Micro Controller yang digunakan

Mitsuba Controller dilengkapi limiter dengan dua metode yaitu membatasi arus listrik yang dialirkan dan membatasi putaran motor. Pada kasus pengujian tanpa beban ini tentunya pembatasan arus listrik tidak terjadi karena arus yang terukur masih kecil yaitu 1,070 A. Sehingga pembatasan yang dimungkinkan adalah pembatasan putaran motor. Apabila pembatasan tersebut tidak dapat di program ulang oleh pemakai maka performa motor tidak dapat menyesuaikan dengan kondisi pemakai. Hal ini terjadi pada saat Mitsuba Controller digunakan untuk Lomba World Solar Challenge 2013. Mobil Sapu Angin Surya pada saat itu hanya mampu berjalan dengan kecepatan maksimum 85 km/jam. Pengalaman ini menjadi pertimbangan bahwa pada tahun 2015 ITS Solar Car Racing Team harus memakai Controller buatan sendiri.

#### **4.2.2.2 Uji dengan Pembebanan**

Pengujian dilakukan dengan menggunakan Motor buatan Agus Nurtriatono Mahasiswa Teknik Mesin Tahun 2009. Baterai yang digunakan adalah LiFePo4 60AH dengan tegangan nominal 96 Volt DC. Motor tersebut dikopel dengan generator untuk menyalakan lampu sebagai beban. Beban bervariasi dari 100 watt sampai 1800 watt dengan kenaikan 100 Watt. Data yang diperoleh dapat dilihat pada lampiran. Berikut grafik hasil uji pembebanan Controller ini :

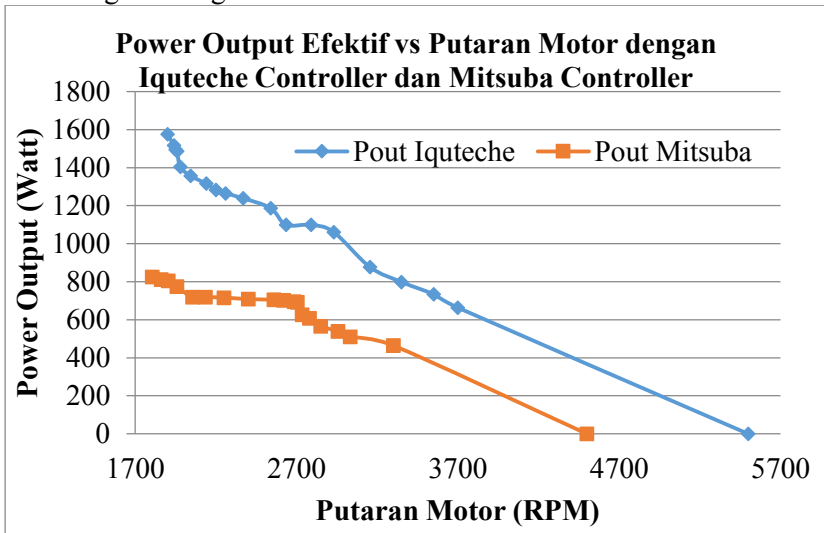


Gambar 4.22 Grafik Power Input vs Putaran Motor dengan Iquteche Controller dan Mitsuba Controller

Power input merupakan perkalian Tegangan (Volt) dan Arus yang mengalir pada Controller (Ampere). Berdasarkan gambar 4.22 menunjukkan bahwa semakin besar putaran motor maka power input yang diperlukan untuk menggerakkan motor tersebut semakin kecil. Power input pada Iquteche Controller lebih besar dibandingkan dengan Mitsuba Controller. Power input yang lebih besar belum tentu memiliki performa yang lebih buruk. Performa motor ditentukan dengan membandingkan kedua parameter yaitu nilai Pin dengan Pout efektif. Iquteche Controller ini memberikan data grafik Peak Power pada setiap putaran motor. Hal ini disebabkan Iquteche Controller belum dilengkapi dengan algoritma limiter, sehingga grafik yang dihasilkan merupakan kemampuan maksimal Motor. Motor tersebut mampu berputar hingga mencapai putaran maksimum 5500 rpm, sedangkan dengan menggunakan Mitsuba Controller hanya dapat berputar 4500 rpm. Trend grafik Pin dengan menggunakan

Iquteche Controller menurun sepanjang kenaikan putaran Motor. Namun trend grafik Pin dengan menggunakan Mitsuba Controller cenderung stabil pada range 1900 – 2400 rpm yaitu dengan rata-rata mencapai 825 Watt. Hal ini menunjukkan sebenarnya Mitsuba Controller sudah dilengkapi dengan algoritma limiter.

Controller yang memiliki limiter, secara fisik dapat diketahui melalui respon motor (akselerasi Motor). Akselerasi Iquteche controller lebih cepat sehingga membutuhkan power yang lebih besar namun pergerakan motor lebih halus apabila dibandingkan dengan Mitsuba Controller.



Gambar 4.23 Grafik Power Output Efektif vs Putaran Motor Iquteche Controller dan Mitsuba Controller

Power output efektif diperoleh dari Output generator dengan formulasi sebagai berikut :

$$P_{gen} = P_{oute\text{efektif}} \times eff_{gen} \times eff_{mekanik} \times eff_{electrical}$$

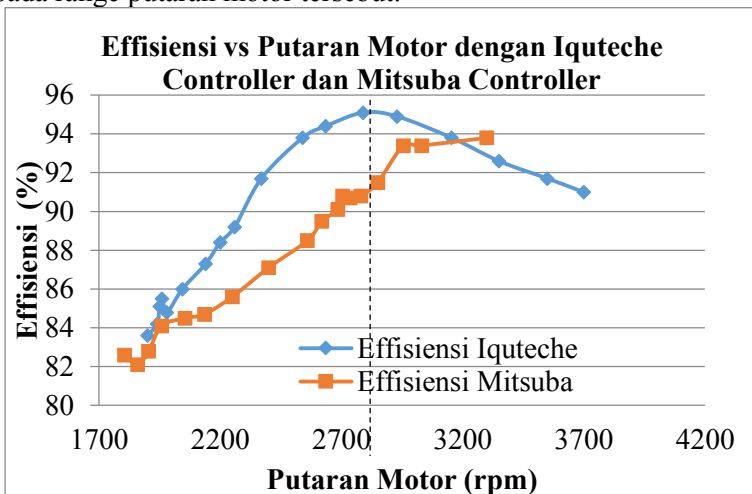


dimana :

$$P_{gen} = V_{out} \times I_{out} \times \sqrt{3}$$

$$eff_{gen} = 60\%, eff_{mekanik} = 90\% \text{ dan } eff_{electrical} = 87\%$$

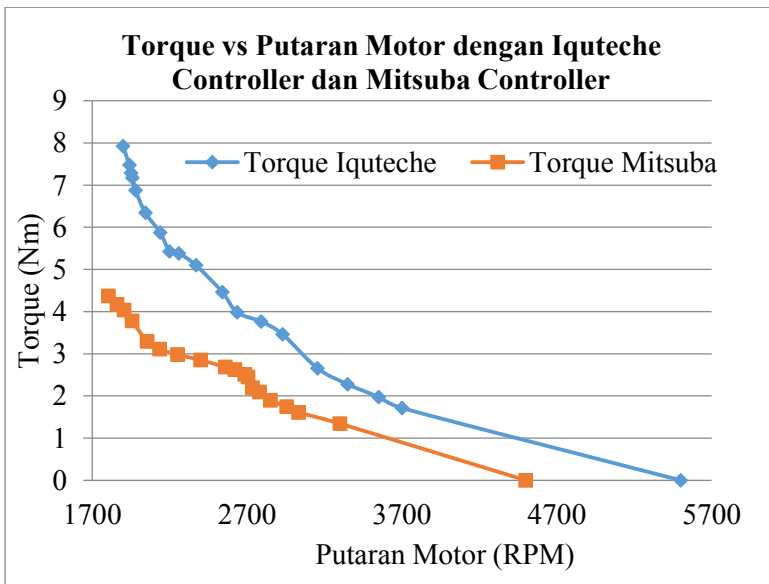
Grafik Power Output efektif terhadap putaran Motor memiliki trend line yang serupa dengan Power Input. Power output efektif pada Iquteche Controller lebih besar dibandingkan dengan Mitsuba Controller. Penggunaan Controller yang sesuai dapat meningkatkan performa Motor Listrik. Trend grafik Power output dengan menggunakan Iquteche Controller menurun sepanjang kenaikan putaran Motor. Namun trend grafik Power Output dengan menggunakan Mitsuba Controller cenderung stabil pada range 2055 – 2780 rpm yaitu dengan rata-rata mencapai 780 Watt. Hal ini menunjukkan Mitsuba Controller memiliki limiter pada range putaran motor tersebut.



Gambar 4.24 Grafik Effisiensi vs Putaran Motor Iquteche Controller dan Mitsuba Controller

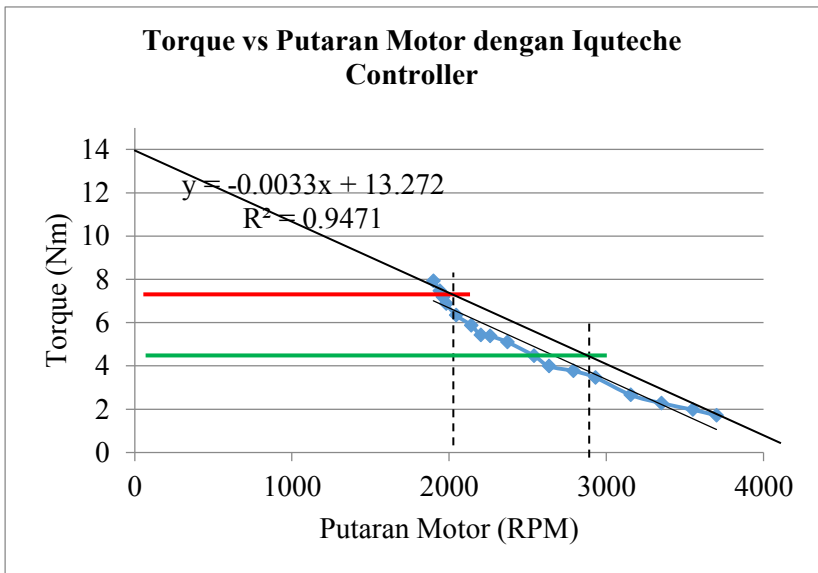
Berdasarkan gambar 4.24 menunjukkan bahwa kedua trend grafik diatas sesuai dengan karakteristik motor yang ada saat ini. Sepanjang peningkatan putaran Motor Listrik nilai

Effisiensi Iquteche Controller lebih besar dibandingkan menggunakan Mitsuba Controller kecuali pada putaran lebih dari 3200. Pada daerah ini nilai Effisiensi Controller Iquteche menurun, daerah ini dinamakan Stall RPM. Sebaiknya Motor Listrik ini tidak dioperasikan pada daerah ini, sehingga perlu algoritma limiter pada daerah ini. Effisiensi terbesar dengan menggunakan Mitsuba Controller terjadi pada putaran 3300 rpm yaitu sebesar 94,8 %. Effisiensi terbesar dengan menggunakan Iquteche Controller terjadi pada putaran 2790 rpm yaitu sebesar 95,1 %. Penggunaan motor Controller yang berbeda akan mempengaruhi karakteristik Motor Listrik dengan adanya pergeseran nilai Effisiensi. Effisiensi menggunakan Mitsuba Controller tidak mengalami penurunan, menunjukkan Controller ini sudah terdapat limiter untuk menghindari daerah Stall RPM.



Gambar 4.25 Grafik Torque vs Putaran Motor Iquteche Controller dan Mitsuba Controller

Gambar di atas menunjukkan hubungan torque terhadap nilai putaran motor. Semakin besar putaran motor semakin kecil nilai Torque yang dihasilkan. Torque motor yang menggunakan Iquteche Controller lebih besar dibandingkan dengan menggunakan Mitsuba Controller. Torque Motor dengan Iquteche Controller ini merupakan nilai Peak dari performa Motor karena belum diberi algoritma limiter, sehingga dapat diperoleh Grafik karakteristik Motor tersebut sebagai berikut :



- Aplikasi Solar Car
- Aplikasi Effisiensi Maksimal

Gambar 4.26 Grafik Karakteristik Motor Uji

Berdasarkan gambar 4.26 dapat diperoleh beberapa aplikasi motor sebagai berikut :

### 1. Aplikasi pada Daerah Effisiensi Maksimal

Effisiensi tertinggi terjadi pada putaran Motor sebesar 2790 rpm yaitu sebesar 95,1 %. Agar Motor dapat beroperasi pada daerah ini maka perlu dibatasi arusnya dengan Constant

---

Torque sebesar 3.76 N.m. Pada titik ini diperlukan arus sebesar 17.3 Ampere, sehingga Controller menggunakan limit arus ini. Untuk aplikasi pada daerah efisiensi maksimal dapat menggunakan karakteristik bergaris hijau.

## 2. Aplikasi untuk World Solar Challenge 2015

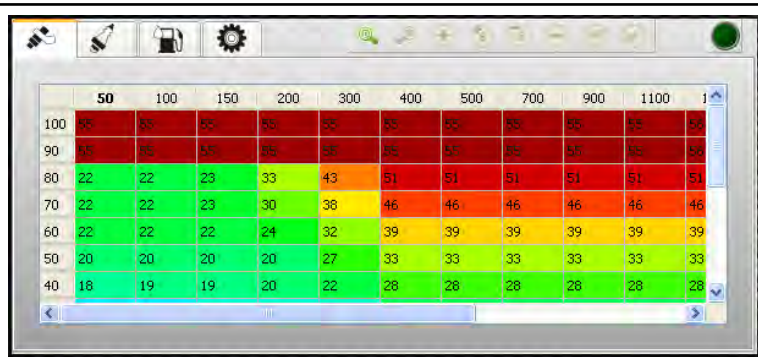
Mobil pada kompetisi World Solar Challenge 2015 memerlukan putaran Motor sebesar 2000 rpm agar mampu berjalan dengan kecepatan 160 km/jam. Agar motor ini dapat bekerja pada daerah operasi tersebut maka Controller perlu diberi limiter pada Constant Torque 6.34 N.m dengan daerah Stall mulai pada putaran 2000 rpm. Pada titik ini diperlukan arus sebesar 12.6 Ampere, sehingga Controller menggunakan limit arus ini. Untuk aplikasi World Solar Challenge 2015 dapat menggunakan daerah dengan garis merah.

## 3. Aplikasi untuk Racing

Case aplikasi untuk racing menggunakan daerah performa maksimal Motor, yaitu pada karakteristik Motor itu sendiri. Case ini tidak diperlukan algoritma limiter. Case ini dapat dilihat pada gambar 4.26 pada *trend line* garis hitam.

### 4.2.2.3 Tuning Manager

Salah satu keunggulan Modular Controller ini adalah controller ini dilengkapi dengan software Tuning Manager. Sehingga motor dapat disesuaikan dengan kondisi operasi. Parameter yang dapat dirubah meliputi putaran motor (rpm), current limit (A), dan Torque (N.m). Berikut ini tampilan *Tuning Manager* Iquteche Controller :



Gambar 4.27 : Tuning Manager Iquteche Controller

Gambar tersebut menunjukkan nilai Prosentase Pulse Width Modulation (PWM) yang digunakan untuk switching Sequential Logic pada Controller. Kolom pertama menunjukkan putaran motor (rpm) sedangkan baris pertama menunjukkan prosentase *Throttle Position Sensor* (TPS). Nilai Prosentase PWM akan memberikan arus berdasarkan putaran motor. Tabel tersebut dimasukkan pada algoritma switching dengan menggunakan metode *Look up Table*. Melalui metode ini performa motor dapat diatur sesuai dengan keperluan. Perlu diketahui terlebih dahulu hubungan nilai PWM terhadap arus yang dialirkan pada setiap putaran motor untuk menghasilkan performa motor yang lebih baik.

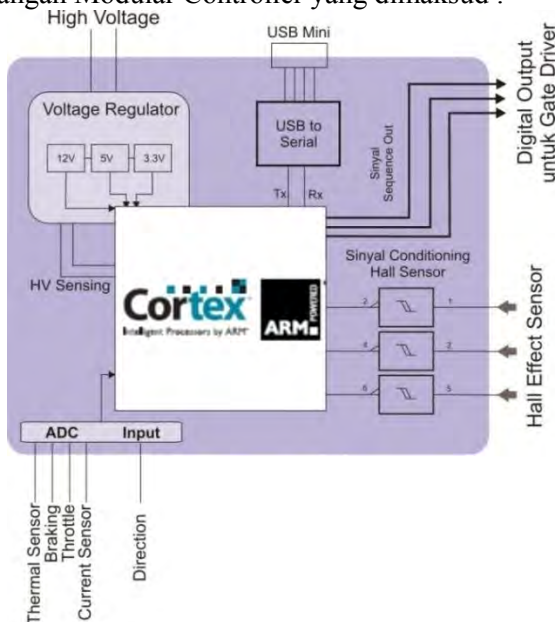
**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

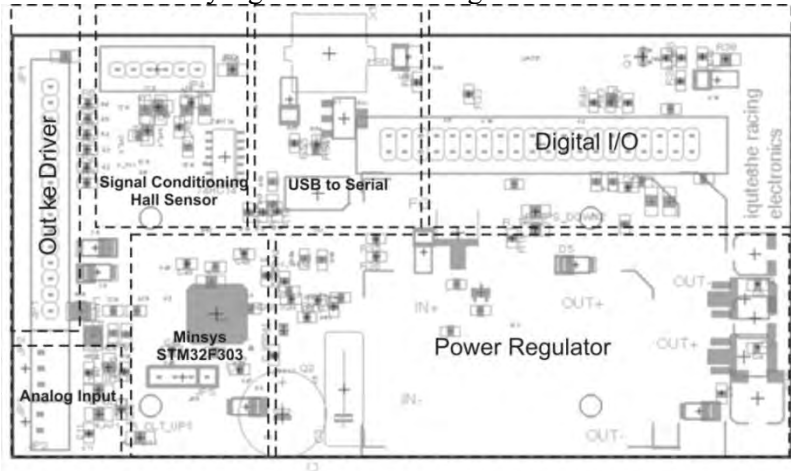
Kesimpulan Tugas Akhir dengan topik perancangan dan pembuatan *Modular 3 Phase Brushless DC Motor Controller* ini adalah sebagai berikut :

1. Modular Controller Iquteche dapat diaplikasikan pada motor dengan daya yang bervariasi (teruji pada 500 Watt, 1 KW dan 2 KW). Algoritma dapat di-Program ulang oleh pengguna dengan men-Setting tabel pada *Tunning Manager*. Arus dan RPM dapat dibatasi sesuai dengan aplikasi pengguna. Pengguna dapat mengatur akselerasi, mengatur putaran maksimum, mengatur arus yang dialirkan. Berikut perancangan Modular Controller yang dimaksud :



Gambar 5.1 : Spesifikasi Modular Controller Iquteche

Desain PCB yang telah dibuat sebagai berikut :



Gambar 5.2 : Desain PCB Modular Controller Iquteche

2. Modular Controller Iquteche memiliki performa lebih baik daripada Mitsuba Controller pada parameter tertentu. Berikut beberapa parameter yang diuji :
  - a. Berdasarkan pengujian sinyal, Sinyal yang dihasilkan Controller Iquteche konsisten seperti Mitsuba controller.
  - b. Berdasarkan Uji top speed, Iquteche Controller memiliki top speed yang lebih besar daripada Mitsuba Controller, yaitu sebesar 8238 rpm sedangkan Mitsuba hanya sebesar 4536 rpm.
  - c. Berdasarkan uji pembebanan, Peak efisiensi Iquteche Controller lebih tinggi dibandingkan dengan Mitsuba Controller yaitu sebesar 95,1 % pada 2790 rpm. Sedangkan Mitsuba Controller memiliki Efisiensi maksimal sebesar 94,8 % pada 3300 rpm.



---

## 5.2 Saran

Untuk pengembangan Modular controller, berikut saran-saran yang perlu diperhatikan :

1. Soket Modular Controller dan Driver Module dibuat standar sehingga memudahkan instalasi.
2. Iquteche Controller sebaiknya dilengkapi dengan algoritma regenerative braking.
3. Perlu dilakukan pengujian endurance pada masing-masing Controller untuk melihat Thermal management dan ketangguhan Controller.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

---

## DAFTAR PUSTAKA

Abou-Kasm Rachid G.. 2013. *Universal Control Unit for Brushed or Brushless DC Motor*. U.S. Patent No.US20130249458 A1.

Aitken Andy. 2013. *Master configuration of the Gen 4 Size 8*. YASA Motors : Oxfordshire.

Cody, Jarrad. 2009. *Regenerative Braking in an Electric Vehicle*. University of South Australia : Australia.

Guohui Jiang. 2013. *DC Brushless Motor Control System*. China Patent No. CN202931239 U.

Knight Colin. 2013. *Programmable Portable Power Tool with Brushless DC Motor*. Patent No. CA2800792 A1.

Marchitto Luciano. 2013. *Controller for a Three-Phase Brushless D.C. Motor*. U.S. Patent No. US 20130264979A1.

Kimura, Masakatu. 2009. *Special Motor for Solar Car Powered by MITSUBA Instruction Manual Book*. Nomura : Japan.

Leonard N. Elevich. 2005. *3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers*. Freescale Semiconductor : Arizona.

NEC Corporation. 2006. *3-Phase Brushless DC Motor Control 120-Degree Trapezoidal Drive with Hall Sensors for MC-LVKIT-714 Motor Control Evaluation System*. NEC Electronics Corporation : Germany.

Shane W. Colton. 2010. *Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control*. Massachusetts Institute of Technology : Amerika.

Tim Mobil Listrik Nasional. 2012. *Roadmap Pengembangan Mobil Listrik Nasional*. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan : Indonesia.

---

---

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Nganjuk, 08 Agustus 1990, merupakan anak terakhir dari 6 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Begadung 1 Nganjuk, SMPN 1 Kertosono dan SMAN 2 Nganjuk. Setelah lulus dari SMAN tahun 2009, Penulis mengikuti PMDK-Prestasi dan diterima di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2009 dan terdaftar dengan NRP 2109100016.

Di Jurusan Teknik Mesin ITS ini Penulis mengambil Bidang Studi Manufaktur. Penulis mulai tertarik pada Sistem Kontrol dan masuk di Laboratorium Sistem dan Otomasi Industri pada semester 4. Penulis pernah mengikuti kegiatan World Solar Challenge 2013 di Darwin – Adelaide Australia. Penulis juga aktif mengikuti riset Mobil Listrik Nasional ITS sampai sekarang. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan mahasiswa seperti Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM), UKM Pramuka ITS, UKM Badminton ITS, dan Pemandu ITS. Penulis juga pernah menjadi grader mata kuliah Statika, dan Asisten Laboratorium di bidang Mekatronika.